Aus dem Physiologischen Institut, Lehrstuhl II
der Universität Düsseldorf
Direktor: Professor Dr. J. Haase

FEHLFARBEN, ALYCHNEN UND KONVERGENZ-ABGLEICHE VON DEUTERANOPEN BEI GROSSER REIZFLÄCHE

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Düsseldorf

vorgelegt von
Peter Scheufens

1983

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543926_0013

Aus dem Physiologischen Institut, Lehrstuhl II
der Universität Düsseldorf
Direktor: Professor Dr. J. Haase

FEHLFARBEN, ALYCHNEN UND KONVERGENZ-ABGLEICHE VON DEUTERANOPEN BEI GROSSER REIZFLÄCHE

vorgelegt von
Peter Scheufens

DISSERTATION

Zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin der
Medizinischen Fakultät der Universität Düsseldorf

1983

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität Düsseldorf

Der Dekan
der Medizinischen Fakultät
der Universität Düsseldorf
gez.:Prof. Dr. Brüster

Referent:
Prof. Dr. H. Scheibner
Korreferent:
Priv.-Doz. Dr. H.J. Trampisch

Meinen Eltern gewidmet

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
A. Einleitung	1
B. Allgemeine und spezielle Grundlagen	2
1. Mathematische Grundlagen	2
2. Farbvalenz, Farbenraum, Farbmessung und Farbsysteme	6
3. Die mesopische Großfeldfarbanpassung	10
4. Farbenfehlsichtigkeit; Fusions- und Ausfallhypothese	11
5. Fehlfarben und Prinzip der Fehlfarbenbestimmung	12
6. Reduktion der Trichromasie auf eine Deuteranopie	16
7. Alychnen und Prinzip der Alychnenbestimmung	18
8. Reduktion der Trichromasie auf eine Quasimonochromasie	21
9. Farbart, Farbwertanteile und Farbtafel; Berechnung der Schnittspur der Alychne mit der Farbtafel	23
10. Der Konvergenz-Abgleich	24
11. Der dichromatische Großfeldfarbenraum	26
C. Aufgabenstellung	28
D. Methodik	29
12. Versuchspersonen	29
13. Apparatur	29

Seite

14. WDW-System und spezielle deuteranopische Normierungen 34

15. Messung von Leuchtdichten; Kalibrierung des DFM; Umrechnung ins CIE-System 35

E. Versuchsdurchführung 41

16. Fehlfarben 41

17. Alychnenbestimmung bei Großfeldbeobachtung 43

18. Der Konvergenz-Abgleich 44

F. Ergebnisse 46

19. Fehlfarben bei Klein- und Großfeldbeobachtung im modifizierten WDW-System 46

20. Darstellung der Großfeldergebisse im CIE-System 1964 46

21. Großfeld-Verwechslungsgeraden bei Kleinfeldnormierung 48

22. Reduktion der Großfeld-Trichromasie auf eine Großfeld-Deuteranopie 55

23. Großfeldalychnen und Reduktion auf eine Quasimonochromasie 57

24. Der Konvergenz-Abgleich 69

25. Algebraische Beziehung zwischen Farbenräumen verschiedener Dimension und Gesichtsfeldgröße 79

G. Diskussion

26. Dichromatische oder trichromatische Wahrnehmung "klassischer" Deuteranopen bei großen Reizflächen?
27. Der Feldgrößeneffekt
28. Fehlfarben
    a. Fehlfarben bei Kleinfeldbeobachtung (2°) auf mesopischem Leuchtdichteniveau
    b. Fehlfarben bei Großfeldbetrachtungsweise auf mesopischem Leuchtdichteniveau
29. Alychnen und Hellempfindlichkeitskurven bei Großfeldbetrachtungsweise auf mesopischem Leuchtdichteniveau
30. Fusion oder Ausfall?
31. Der Konvergenz-Abgleich
32. Der Maxwellsche Fleck

H. Zusammenfassung

I. Schrifttum

A. Einleitung

"Farben sind Taten und Leiden des Lichtes", so hat es Goethe in seinen Schriften zur Farbenlehre, die er selbst als sein Hauptwerk betrachtete, immer wieder formuliert und hinzugefügt: "Wär nicht das Auge sonnenhaft, wie könnten wir das Licht erblicken." (zit. nach (141)).
Physikalisch gesehen, ist Licht nur ein enger Bereich elektromagnetischer Wellen, die von der Sonne abgestrahlt werden und für die verschiedensten Organismen auf unserer Erde im Laufe der Evolution spezielle Empfänger-Sinneszellen in der Netzhaut des Auges- entwickelt haben. Der englische Physiker Thomas Young (151) vertrat in seinem berühmt gewordenen Vortrag vor der Royal Society in London im Jahre 1802 die Meinung, im menschlichen Auge gebe es nur drei Typen von Sehzellen, die für jeweils einen Farbreiz maximal empfindlich sind. Helmholtz (29) hat um die Mitte des vorigen Jahrhunderts diese Theorie aufgegriffen und weiter ausgebaut, indem er spezielle Rezeptoren, die Blau, Grün und Rot vermitteln, postulierte. Wenige Jahre später stellte der Leipziger Physiologe Hering der "Dreikomponententheorie", wie sie Young und Helmholtz vertraten, seine "Gegenfarbentheorie" gegenüber. Anstelle von Rezeptoren, die für einen bestimmten Spektralbereich selektiv sind, forderte er Instanzen im visuellen System des Menschen, die auf jeweils zwei komplementäre Spektralreize alternative Antworten zeigen.

Ein 2° großes Gesichtsfeld war die seit Helmholtz' Zeiten als hinreichend angesehene Gesichtsfeldgröße, um ein rein foveales Farbensehen ohne Einmischung der Stäbchen sicherzustellen. Natürlich betrachten wir in der Praxis eine Farbfläche nur selten unter so kleinem Gesichtswinkel, sondern wir beurteilen Farben und Farbgleichheiten lieber unter wesentlich größerem Gesichtswinkel.

Die hier vorgelegte Arbeit will auf einige Phänomene der mesopischen Großfeldfarbabgleiche hinweisen, die bei der experimentellen Ermittlung von Fehlfarben (B.5.), Alychnen (B.7.) und der Durchführung einer speziellen alternierenden Abgleichsmethode höherer Dimension (B.10.) an Farbenfehlsichtigen gewonnen wurden.

B. Allgemeine und spezielle Grundlagen

B.1. Mathematische Grundlagen

Die Sprache der Niederen Farbmetrik (105) (und nur die soll uns hier beschäftigen) ist die lineare Algebra, ihre Anschauung die affine und projektive Geometrie. Drei mathematische Gebilde - der lineare Raum, der affine Raum und der projektive Raum - eignen sich in hervorragender Weise, jeder auf seine Art, farbmetrische Fragestellungen einerseits zu abstrahieren, andererseits einfach zeichnerisch darzustellen. Über die exakten Definitionen obiger Begriffe informiere sich der Leser z. B. bei Kowalsky (42). Die Farbvalenzen (B.2.) als Ortsvektoren eines dreidimensionalen Parallelkoordinatensystems beispielsweise gehorchen den Gesetzen des linearen Raumes. Sieht man von der speziellen Lage der Vektoren im Raum ab, so spricht man von "freien" Vektoren. Ein solcher Vektor erscheint daher als Klasse aller gleich langen und gleich gerichteten Strecken. Dieser Gedanken führt zur Definition des Begriffes des affinen Raumes (42). Der "Fehlfarbenrichtungsvektor" ist wie der "Quervektor" (B.5., B.7.) ein freier Vektor. Jeder Vektorraum V kann als affiner Raum mit sich selbst als zugeordnetem Vektorraum aufgefaßt werden, wenn man für je zwei Vektoren $\vec{a}, \vec{b} \in V$ den Vektor $\vec{ab}$ durch $\vec{b}-\vec{a}$ definiert. Wenn im folgenden die Rede von affinen Räumen sein wird, so ist stets dieser Spezialfall gemeint. Der affine Raum zeichnet sich in der Farbmetrik u. a. dadurch aus, daß er der Darstellung von Alychnen (B.7.) und Isolychnen (B.7.) besonders gut gerecht wird.

Die Sätze der affinen Geometrie enthalten vielfach störende Fallunterscheidungen. So gilt z. B. in einer affinen Ebene nicht allgemein, daß sich zwei Geraden in einem Punkt schneiden. Man kann die affinen Räume zu Räumen erweitern, die man projektive Räume nennt, in denen derartige Ausnahmefälle nicht mehr auftreten. Bei der Konstruktion eines projektiven Raumes gilt das Hauptinteresse jedoch nicht mehr den Vektoren, sondern den eindimensionalen Unterräumen des Vektorraumes, die als Punkte des neuen Raumes aufgefaßt werden sollen. Die Farbtafel (B.9.) stellt einen projektiven Raum dar.

Beziehungen zwischen zwei linearen Räumen V,V* werden durch Abbildungen des einen Raumes in den anderen vermittelt. Dabei inter-

essieren in der linearen Algebra nur solche Abbildungen, die mit den linearen Operationen in geeigneter Weise verträglich sind. Derartige lineare Abbildungen nennt man auch "Homomorphismen" (42). Von besonderer Bedeutung bei meinen Untersuchungen ist der Begriff des Kerns einer linearen Abbildung $\varphi: V \to V^*$. Man definiert: kern $\varphi := \varphi^{-1}(0)$, d. h. Kern φ ist das Urbild des Nullraumes. Wie Kowalsky (42), Satz 8.5. zeigt, ist Kern φ ein Unterraum von V. Unter bestimmten Voraussetzungen läßt sich jeder linearen Abbildung genau eine Matrix zuordnen und umgekehrt jeder Matrix eine lineare Abbildung (54). Seien V, V* lineare Räume über dem Körper K, φ eine lineare Abbildung von V nach V*, $(\vec{a}_1,..,\vec{a}_n)$ eine Basis von V, $(\vec{b}_1,..,\vec{b}_m)$ eine Basis von V*, dann gibt es $c_{ij} \in K$ mit

$$\begin{pmatrix} \varphi\,\vec{a}_1 \\ \varphi\,\vec{a}_2 \\ \\ \varphi\,\vec{a}_n \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \cdots c_{1m} \\ c_{21} & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ c_{n1} & \cdots \; c_{nm} \end{pmatrix}}_{A} \begin{pmatrix} \vec{b}_1 \\ \vec{b}_2 \\ \\ \vec{b}_m \end{pmatrix}$$

A heißt die zur Abbildung φ bezüglich der Basen $(\vec{a}_1,..,\vec{a}_n)$ und $(\vec{b}_1,..,\vec{b}_m)$ gehörige Matrix.

Die Primärvalenztripel $\vec{B}$, $\vec{G}$, $\vec{R}$ bzw. $\vec{X}$, $\vec{Y}$, $\vec{Z}$ (B.2.) sind Basen des dreidimensionalen Farbenraumes, die zugehörigen Farbwerte B, G, R bzw. X, Y, Z (B.2.) die zu den jeweiligen Basen gehörenden Koordinaten. Das lineare Problem $\varphi(\vec{x}) = \vec{p}$, $x \in V$, $p \in V^*$, ist gleichwertig darstellbar in der üblichen Form als Gleichungssystem in K:

$$(1) \qquad \varphi(\vec{x}) = \vec{p} \;\Leftrightarrow\; A^T \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_m \end{pmatrix}$$

, wobei A die zur Abbildung φ bezüglich der Basen $(\vec{a}_1,..,\vec{a}_n)$ und $(\vec{b}_1,..,\vec{b}_m)$ gehörige Matrix darstellt. $(\xi_1, \ldots, \xi_n)$ ist der Koordinatenvektor von $\vec{x}$ bezüglich $(\vec{a}_1,..,\vec{a}_n)$, $(\beta_1, \ldots, \beta_m)$ der Koordinatenvektor von $\vec{p}$ bezüglich $(\vec{b}_1,..,\vec{b}_m)$ (54, S. 84). Der Reduktion der Trichromasie auf eine Dichromasie (B.6.) liegt ein Homomorphismus zugrunde, dessen Abbildungsgleichung für die Farbwerte (S. 21) mit der Zuordnungsvorschrift der Farbvalenzen gemäß der Äquivalenzbeziehung (1) in Zusammenhang steht.

Schon Klein erkannte 1872 in seinem "Erlanger Programm" die Bedeutung der Invarianz von Eigenschaften und Zahlen gegenüber Transformationen. Innerhalb der Farbmetrik spielt die Invarianz gegenüber linearen Transformationen eine besondere Rolle. Sei V_n ein linearer Raum über K, $(\vec{a}_1,..,\vec{a}_n)$ und $(\vec{a}'_1,..,\vec{a}'_n)$ seien zwei verschiedene Basen (Primärvalenztripel) von V_n. Man nennt den Übergang von der ersten Basis zur Zweiten eine Basistransformation (Primärvalenztransformation):

$$(2) \qquad \begin{vmatrix} \vec{a}_1 \\ \vdots \\ \vec{a}_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} d_{ij} \end{vmatrix}_{n,n} \cdot \begin{vmatrix} \vec{a}'_1 \\ \vdots \\ \vec{a}'_n \end{vmatrix} \qquad d_{ij} \in K$$

Den übergang von den Koordinaten (Farbwerten) eines Vektors (Farbvalenz) hinsichtlich einer Basis (Primärvalenztripels) zu den Koordinaten (Farbwerten) bezüglich einer anderen Basis (Primärvalenztripels) bezeichnet man als Koordinatentransformation (Farbwerttransformation):

$$(3) \qquad \begin{vmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{vmatrix} \begin{vmatrix} d_{ij} \end{vmatrix}_{n,n} \qquad \text{, wobei } x_i \text{ und } x'_i$$

Koordinaten (Farbwerte) bezüglich der Basen $(\vec{a}_1,..,\vec{a}_n)$ und $(\vec{a}'_1,..,\vec{a}'_n)$ sind. In dieser Arbeit sind zwei Bezugssysteme der Farbmetrik von Bedeutung, nämlich das B, G, R - oder WDW-System (148) und das CIE-System (18 a). Die Beziehung zwischen Primärvalenzen einerseits und Farbwerten beider Systeme andererseits ergibt sich aus dem oben Genannten und den Gesetzen der Matrizenrechnung (152) wie folgt:

$$\begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} B \\ G \\ R \end{vmatrix} \xleftarrow{\text{Inversion (152)}} \begin{vmatrix} B \\ G \\ R \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D^{-1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix}$$

Kontragredienz (152)

$$\begin{vmatrix} \vec{B} \\ \vec{G} \\ \vec{R} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D^T \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{vmatrix} \xleftarrow{\text{Inversion (152)}} \begin{vmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D^{T-1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \vec{B} \\ \vec{G} \\ \vec{R} \end{vmatrix}$$

Die Leuchtdichtebeiwerte (B.8.) transformieren sich wie Primärvalenzen (97).

Jeder Unterraum eines linearen Raumes V definiert in natürlicher Weise eine Äquivalenzrelation, hinsichtlich derer die Vektoren von V zu Klassen zusammengefaßt werden können. Diese Klassen bilden dann ihrerseits einen Vektorraum, den man als Quotientenraum bezeichnet (42, s. 212 ff).

Es sei V wiederum ein beliebiger Vektorraum über einem beliebigen Skalarenkörper K. Ferner sei U ein Unterraum von V. Zwei Vektoren $\vec{a}, \vec{b} \in V$ heißen u-äquivalent ($\vec{a} \underset{u}{=} \vec{b}$), wenn $\vec{a} - \vec{b} \in U$ gilt.

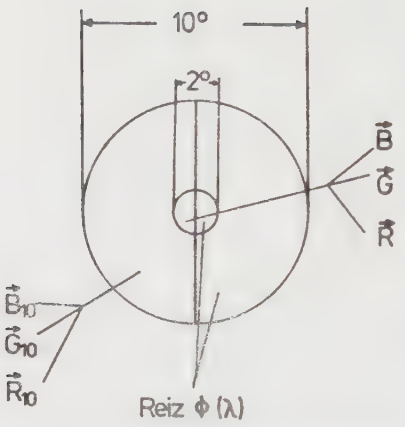
Die U-Äquivalenz ist eine Äquivalenzrelation. Der Vektorraum aller U-Äquivalenzklassen heißt der Quotientenraum von V nach dem Unterraum U. Er wird mit V/U bezeichnet. Ordnet man jedem Vektor $r \in V$ als Bild die von ihm erzeugte Klasse $\bar{r}$ zu, so wird hierdurch eine Abbildung $\omega : V \to V/U$ definiert, die die "natürliche" Abbildung von V auf V/U genannt wird. Für sie gilt: ω ist eine lineare Surjektion mit Kern $\omega = U$ (42, Satz 31.2.) Daraus folgt: ist der Kern einer natürlichen Abbildung bekannt, so ist die Abbildung dadurch bereits eindeutig definiert. Die Fehlfarbe (B.5.) spannt einen eindimensionalen Unterraum des Farbenraumes auf. Sie definiert - legt man als Äquivalenzrelation die U-Äquivalenz zugrunde - einen Quotientenraum, der aus der Menge der isochromatischen Linien im Farbenraum (Nebenklassen zum Kern (96)) besteht. Die "natürliche"Abbildung ordnet also jedem Ausgansreiz die entsprechende Nebenklasse zum Kern zu.

B.2. Farbvalenz, Farbenraum, Farbmessung, Farbsysteme

Das dritte Graßmannsche Gesetz besagt, daß es bei additiven Farbmischungen nur auf das Aussehen, nicht auf die spektrale Zusammensetzung der Mischungskomponenten ankommt. Das gleiche Aussehen deutet man (2,5.) als eine Äquivalenzrelation und teilt mit deren Hilfe die Grundmenge aller wahrnehmbarer Strahlungsreize in Klassen gleichaussehender oder metamerer Reize ein. Die Zusammenfassung aller solcher Klassen stellt eine neue Menge, die sogenannte Quotientenmenge (2), dar, deren Elemente "Farbvalenzen" genannt werden. Diese Klassen sind die Gegenstände der additiven Farbmischung. Die Formulierung der Mischungsoperationen durch Gleichungen zeigt, daß sich Farbvalenzen wie Vektoren verhalten. Um die Strukturisomorphie zwischen Farbvalenzmetrik und affiner Geometrie deutlicher werden zu lassen, sei daran erinnert (94), daß in der affinen Geometrie nur Richtungsgleichheit und Längengleichheit paralleler Vektoren feststellbar sind. Der Satz von der Persistenz der Farbgleichungen besagt, daß einmal eingestellte Farbabgleiche erhalten bleiben, auch wenn sich die Farbstimmung des Auges ändert. Das bedeutet, daß die trichromatischen Klassen metamerer Reize bei Farbumstimmung erhalten bleiben, die Zugehörigkeit einer Strahlung zu ihrer Klasse (Partition) somit unverändert ist (94). Eine entsprechende Invarianz der Klasseneinteilung besteht nicht, wenn man von einem gegebenen Gesichtsfeld zu einem anderer Größe oder auch anderer retinaler Position übergeht. Es gruppieren sich dann Strahlungsreize zu einer neuen Klasseneinteilung zusammen. Die Übertragung zweier solcher trichromatischer Partitionen in den Vektorraum führt nicht zu zwei gleichwertigen Darstellungen in einem Farbenraum, sondern zu zwei Farbenräumen, deren Elemente, das sind Klassen metamerer Reize, nicht miteinander identifiziert werden können. Grundsätzlich sind lineare Transformationen von einem System in das andere nur möglich, wenn die zugrunde liegende Klasseneinteilung besteht (98). Wären nun beide trichromatische Farbenräume auch noch lineare Räume (was vom Grossfeldfarbenraum (S. 11) bestritten wird), so wären sie aufgrund der gleichen Dimension und des gleichen skalaren Körpers isomorph zueinander (54), aber noch lange nicht einer Transformation ineinander zugänglich. Das erste Graßmannsche Gesetz besagt, daß drei Grundfarben zur additiven Farbmischung ausreichend sind. Bei fovealer Betrachungsweise lassen sich die Klassen metamerer Reize den Vektoren eines dreidimensionalen Vektorraumes zuordnen; die Mischungsoperationen in diesem Raum spielen sich nach den Regeln der Vektoraddition ab. Trezona (130) und Blottiau (9) haben dies für ein foveales

Kleinfeld bestätigen können. Andererseits ist seit langem bekannt, daß jenes elegante und praktikable Additivitätskonzept bei trichromatischen Großfeldfarbabgleichen versagt. In neuester Zeit bestehen Ansätze, durch tetrachromatische Farbabgleiche einen Farbenraum zu schaffen, der den Gesetzen des linearen Raumes Genüge tut. Die eindeutige Darstellung einer Farbe durch eine dreidimensionale Vektorgleichung in der Art $\vec{F} = R\,\vec{R} + G\,\vec{G} + B\,\vec{B}$, wo $\vec{R}$, $\vec{G}$, $\vec{B}$ die Bezugsfarben, "Primärvalenzen" genannt, und R, G, B die Komponenten, "Farbwerte" genannt, sind, gilt sowohl für die Kleinfeld- wie auch für die Großfeldfarbabgleiche (132). Die Farbmessung beruht gemäß der zugrunde liegenden Äquivalenzrelation nur auf Gleichheitsurteilen, nicht etwa auf Urteilen über Farbunterschiede. Die Ermittlung von drei zu einer Farbvalenz gehörigen Farbwerte für einen bestimmten Beobachter heißt "Farbmessung" (18 a). Eine Farbgleichung stellt man üblicherweise auf einem zweigeteilten Photometerfeld ein, indem man einen vorgegebenen, auf der einen Hälfte erscheinenden Strahlungsreiz mit Hilfe dreier in der benachbarten Hälfte erscheinender Bezugsstrahlungen additiv nachmischt, so daß die beiden Feldhälften nach Farbton, Sättigung und Helligkeit übereinstimmen. Die beiden Farbreize in den zwei Feldhälften sind dann im allgemeinen von durchaus verschiedener spektraler Beschaffenheit. Siehe dazu Abbildung 1.

Äquivalenzrelationen müssen die Eigenschaften der Reflexivität, Symmetrie und Transitivität besitzen. Wegen verschiedener individueller Farbunterschiedsschwellen bei natürlichen Beobachtungen, ist insbesondere die Transitivitätsforderung häufig nicht gewährleistet. Der Mangel kann dadurch behoben werden, daß die Zuordnung eines Farbreizes in eine Äquivalenzklasse durch eindeutige mathematische Vorschriften erzwungen wird. Das führt auf die Definiton eines farbmetrischen Normalbeobachters. Da jeder beliebige Farbreiz als Summe von Spektralreizen aufgefaßt werden kann, ergibt sich jede reelle Farbvalenz aus der additiven Mischung der entsprechenden Spektralvalenzen, so daß aus den Farbgleichungen der Spektralvalenzen die Farbgleichung abgeleitet werden kann. Die Farbwerte der Spektralvalenzen, die "Spektralwerte", sind deshalb die Grundlage der Farbvalenzmetrik (99).



$$\vec{C} = B\vec{B}(460) + G\vec{G}(530) + R\vec{R}(650)$$

$$\vec{C}_{10} = B_{10}\vec{B}_{10}(460) + G_{10}\vec{G}_{10}(530) + R_{10}\vec{R}_{10}(650)$$

Abb. 1: Gesichtsfeld des in Abb. 5 skizzierten DFM nach Guild-Bechstein (6). Durch Einschieben einer Blende kann das Gesichtsfeld von 10° auf 2° im Durchmesser eingegrenzt werden. Die Farbreizfunktion $\phi(\lambda)(50, 84)$ ist unabhängig von der Feldgröße. Bei Großfeldbeobachtung wird ihr die Farbvalenz $\vec{C}_{10}$, bei Kleinfeldbetrachtung die Farbvalenz $\vec{C}$ zugeordnet.

Sie definieren durch die Mittelung über die individuellen Farbgleichungen einer größeren Zahl von Beobachtern den Normalbeobachter. Ein spezielles System von Spektralwertkurven, das in den Zapfen der menschlichen Netzhaut als Empfindlichkeitskurven realisiert sein soll, wird auch "Grundspektralwertkurven" genannt. Zwei Bedingungen sollten Grundspektralwertkurven erfüllen:

1. Sie sollten keine negativen Äste und
2. eine möglichst einfache Gestalt mit nur einem Maximum haben.

In Abhängigkeit von der Qualität und Quantität der Primärvalenzen und der Größe des Gesichtsfeldes unterscheidet man verschiedene Farbsysteme. Wir haben das trichromatische System mit drei Primärvalenzen, das dichromatische System, das zwei Primärvalenzen erfordert und das monochromatische System, das mit einer Bezugsfarbe auskommt. Ein Dichromat stellt ein echter Reduktionstyp dar, wenn seine zugrundeliegende Klasseneinteilung auf der Grundmenge der Farbreize eine echte Vergröberung der trichromatischen Einteilung ist. Auch die Monochromasie beruht auf einer Vergröberung einer vorhandenen Klasseneinteilung (95). Unter den trichromatischen Systemen ist das WDW- und das CIE- Normvalenzsystem (18 a) hier von Bedeutung. Sie unterscheiden sich in der Wahl der Primärvalenzen. Das Normvalenzsystem ist heute die Grundlage aller Farbmaßangaben; seit einigen Jahren haben wir zwei Normvalenzsysteme; das eine von 1931 gründet sich auf die Spektralwertbestimmungen von Guild (28) und Wright (147), die mit einem 2° großen Gesichtsfeld in ihren Geräten gearbeitet haben. Natürlich betrachten wir in der Praxis eine Farbfläche lieber unter wesentlich größerem Gesichtswinkel. Deshalb hat die CIE im Jahre 1964 ein zweites, ein "Großfeld- (10°) - Normvalenzsystem" angenommen, das auf Spektralwertbestimmungen von Stiles (120) und Speranskaja (111) zurückgeht.

Verzichtet man bei Farben auf Aussagen über die Intensität oder Helligkeit, so gelangt man vom dreidimensonalen affinen Raum zum zweidimensionalen projektiven Raum, der Farbtafel. Auf dieser werden die sogenannten "Farbarten" dargestellt. Das Koordinatensystem der Farbtafel besteht aus drei Grundpunkten und dem Einheitspunkt. Die Grundpunkte werden mit den Farbarten der Primärvalenzen identifiziert. Der Einheitspunkt liegt in der Farbenlehre immer im Schwerpunkt des von den Grundpunkten gebildeten Dreiecks. Das hat zur Folge, daß sich die Mischungsbeziehungen nach der Schwerpunktsregel abspielen (94). Die Punkte der Farbtafel beschreiben die Farbörter zu den Farbvalenzen gleicher Richtung, aber beliebiger Länge oder Helligkeit. Die Farbtafel liegt auf den Endpunkten der drei Primärvalenzen.

B.3. Die mesopische Großfeldfarbanpassung

Die mesopische Großfeldfarbanpassung ist ein Farbabgleich unter Benutzung eines großen Gesichtsfeldes innerhalb eines bestimmten Leuchtdichteintervalls. Der mesopische Leuchtdichtebereich liegt zwischen $3 \cdot 10^{-3}$ und 30 Trol (52, S. 104). Die Grenzen sind vom Spektralbereich abhängig. Mit abnehmender Leuchtdichte zeigt sich zuerst bei kurzwelliger Strahlung skotopisches Verhalten (40). Die Fähigkeit des Farbensehens geht im mesopischen Bereich stetig spektral spezifisch verloren (139). Der Sinn des mesopischen Experimentierniveaus liegt darin, Stäbchen am Farbabgleich - in welcher Weise auch immer - partizipieren zu lassen und den speziellen Einfluß der Stäbchen - wenn es einen solchen gibt - herauszustellen. Bei der Betrachtungsweise durch ein 10°-Gesichtsfeld findet man im weitaus größten Teil des aktivierten Netzhautgebietes Stäbchen. Eine Folge der Stäbchenaktivität - genauer gesagt eine Folge unterschiedlicher Aktivierung der Stäbchen in beiden Hälften des Gesichtsfeldes - ist offenbar die Nicht-Additivität (133). Sicher ist, daß ein im Photopischen erfolgter Farbabgleich, der Gleichheit der der Helligkeit einschließt, im Mesopischen gestört ist. Nach Palmer (74 a) und Trezona (134) erfordern Farbabgleiche bei niedrigen Leuchtdichten eine zusätzliche vierte Primärvalenz, um eine lineare Metrik sicher zu stellen. Wählt man jedoch den Leuchtdichtebereich beliebig klein, so läßt sich, wie ich glaube, für den Farbenraum innerhalb dieser Grenzen mit Annäherung Linearität postulieren. Wird hier Linearität des Großfeldfarbenraumes vorausgesetzt, so ist damit stets der "Farbenraum" innerhalb eines bestimmten möglichst engen Leuchtdichtebereichs gemeint. Dieser differentielle Charakter ist als ein Zugeständnis an den Großfeldfarbenraum zu verstehen.

Für einige Beobachter wirkt sich ein im Zentrum des Photometerfeldes auftretender Fleck - der Maxwellsche Fleck - als störend aus. Mögliche Ursachen und Vermeidung dieses Phänomens werden in Abschnitt G.32. diskutiert.

B.4. Farbenfehlsichtigkeit; Fusions- und Ausfallhypothese

Es gibt verschiedene Arten von Farbenfehlsichtigkeit. Etwa 8 % der männlichen, aber nur 0,4 % der weiblichen Bevölkerung sind nicht farbennormalsichtig. Einge Gruppe von Fehlsichtigen (3 %) hat zwar ein gewisses Farbunterscheidungsvermögen, verwechselt aber Farben, die vom Normalsichtigen unterschieden werden. Man nennt sie Dichromaten und diesen Typ der Fehlsichtigkeit "Dichromasie". Eine andere Gruppe (5 %), die "Anomalen", unterscheiden Farbvalenzen, die für den Normalsichtigen gleich sind und verwechselt dafür bestimmte für den Normalsichtigen verschiedene Farben. Die Alteration eines Sehpigmentes mit der Folge einer Verschiebung des Absorptionsmaximums scheint hierfür die Ursache zu sein. Schließlich gibt es noch eine sehr kleine Gruppe von Menschen, die "Monochromaten", die gar kein Farbunterscheidungsvermögen haben und nur hell und dunkel erkennen. Lediglich die Monochromaten sind total farbenblind, während die Dichromaten allenfalls "partiell farbenblind" genannt werden können.

Die Dichromaten sind durch folgende Besonderheiten charakterisiert:

1. Farbgleichungen, die von Normalsichtigen anerkannt werden, werden auch von Dichromaten anerkannt.
2. Bestimmte für den Normalsichtigen verschiedene Farben kann der Dichromat nicht unterscheiden.
3. Die Dichromaten haben mindestens eine Stelle im Spektrum, die für sie unbunt erscheint.
4. Alle Bunttöne, die der Dichromat unterscheiden kann, kommen für ihn auch im Spektrum vor. Jeder Farbreiz läßt sich also für ihn durch Änderung der Strahldichte einem Spektralreiz gleichmachen.
5. Den Dichromaten reichen zwei Primärvalenzen aus,um alle Farben additiv nachzumischen, die sie unterscheiden können. Ihr Farbenraum ist also nur zweidimensional, und die Mannigfaltigkeit der von ihnen unterscheidbaren Farbarten ist eindimensional. Es gibt drei Gruppen von Dichromaten, die "Protanopen" oder Rotblinden, die "Deuteranopen" oder Grünblinden und die "Tritanopen" oder Blaublinden. Nach Rushton (92,93) werden die in den Sehzapfen lokalisierten Sehpigmente "Erythrolab", "Chlorolab" und "Cyanolab" genannt. Dabei ist Erythrolab das in dem langen Wellenlängenbereich absorbierende Sehpigment, während Chlorolab in mittleren Wellenlängenbereichen und Cyanolab im kurzwelligen Bereich absorbiert. Nach allgemein anerkannter Auffassung sind die Dichromaten Reduktionsformen der normalen Trichromaten (95). Im Gegensatz zu den normalen Trichromaten mit drei

Spektralwertkurven besitzen die Dichromaten nur zwei Spektralwertkurven (84). Die Publikationen der letzten Jahre haben gezeigt, daß es sinnvoll ist, Farbenfehlsichtigkeiten immer in Beziehung zur Größe und retinalen Position der Reizfläche zu sehen, für welche auch die Fehlsichtigkeit diagnostiziert worden ist (s. G. 26.). Schon Th. Young (151) äußerte die Vermutung, daß die Dichromaten sich dadurch von den normalen Trichromaten unterscheiden, daß in ihrer Netzhaut eine Zapfenart nicht funktionsfähig ist (Ausfallhypothese). Dieser Erklärung der Dichromasie steht die Fusionshypothese speziell der Deuteranopie gegenüber. Unter Fusion versteht man in dem Zusammenhang eine Verschmelzung zweier Mechanismen. Grund für diese unterschiedliche Auffassungen gibt auf der einen Seite die starke Streuung der deuteranopischen Fehlpunkte, auf der anderen Seite ein dem normalen Trichromaten ähnlicher Verlauf der spektralen Hellempfindlichkeit. 1873 vertrat Aitken (1) die Ansicht, daß eine Fusion der beiden langwelligen Pigmente stattfinden müsse. Ebenso sprachen sich Fick (21) und Leber (53) für die Fusion der langwelligen Grunderregungskurven aus. Willmer (144) forderte 1949 die Unterscheidung zwischen zwei Typen der Deuteranopie, wobei Typ Willmer I die gleiche Hellempfindlichkeitskurve wie ein normaler Trichromat haben soll. Unter Typ Willmer II versteht man eine Reduktionsdeuteranopie mit einem normalen Erythrolab (s. o.) als langwelligem Pigment (144). Diese Reduktionsform zeichnet sich durch eine deutlich zu langen Wellenlängen verschobene spektrale Hellempfindlichkeit aus (49).

5.5. Fehlfarben und Prinzip der Fehlfarbenbestimmung

Auf Helmholtz (29) geht die Veranschaulichung der Dichromasie in der trichromatischen Farbtafel mittels einer "Fehlfarbe" zurück. Für einen Dichromaten liegen Verwechslungsfarben auf Geraden, die sich alle in einem Punkt, dem Fehlpunkt, schneiden. Dieser Punkt beschreibt die Farbart der Fehlfarbe. Um den Fehlpunkt zu bestimmen, benötigt man also mindestens zwei solcher Geraden. Jede dieser Geraden ist durch zwei Farbarten, die für den Dichromaten ununterscheidbar sind, festgelegt. Insgesamt benötigt man folglich mindestens vier Farbarten zur Bestimmung des Fehlpunktes eines Dichromaten. Wenn man hingegen im trichromatischen Farbenraum statt in der Farbtafel operiert, genügen ein Farbabgleich eines Trichromaten und eine geeignete Wiederholung desselben Farbabgleiches durch den Dichromaten, um dessen

Fehlfarbe zu bestimmen. Der Differenzvektor dieser beiden Farbvalenzen stellt einen Fehlfarbenrichtungsvektor dar. Die Fehlfarbe selbst wird in der vorliegenden Arbeit als eine zum Fehlfarbenrichtungsvektor parallele durch den Nullpunkt des Koordinatensystems verlaufende Gerade aufgefaßt mit der algebraischen Eigenschaft eines eindimensionalen Unterraumes. Jeder zur Fehlfarbe parallele Vektor ist ein Fehlfarbenrichtungsvektor. Dafür, daß beide Verfahren zur Bestimmung einer Fehlfarbe auf das Gleiche hinauslaufen, hat Judd (1964) (35) einen speziellen Beweis erbracht. Die Bestimmung der Fehlfarbe (besser: eines Fehlfarbenrichtungsvektors) gestaltet sich explizite folgendermaßen: Mit Hilfe eines Dreifarbenmeßgerätes mit den drei instrumentellen, reellen Primärvalenzen $\vec{D}$, $\vec{E}$, $\vec{F}$ wird ein vorgegebener Farbreiz $\vec{C}_o$ abgeglichen. Es ergebe sich folgende Farbgleichung: $\vec{C}_o = D_o \vec{D} + E_o \vec{E} + F_o \vec{F}$ D_o, E_o, F_o seien dabei die zu den Primärvalenzen $\vec{D}$, $\vec{E}$, $\vec{F}$ gehörende Farbwerte. Nun werde dieser Farbabgleich durch Variation des grünen Farbwertes E zerstört. Im Gegensatz zum Trichromaten gelingt es dem Dichromaten allein durch Verändern von D und F wieder einen Farbabgleich, z. B. mit den Farbwerten D_1, E_1, F_1 zu erzielen: $\vec{C}_1 = D_1 \vec{D} + E_1 \vec{E} + F_1 \vec{F}$. Für den Dichromaten sind die beiden Farbvalenzen C_o und C_1 ununterscheidbar. Der Differenzvektor $\vec{C}_1 - \vec{C}_o$ ist im dichromatischen System der Nullvektor, im trichromatischen System hingegen ein vom Nullvektor wohl unterscheidbarer Vektor, nämlich der Fehlfarbenrichtungsvektor $\vec{\Delta}$. Er zeigt unmittelbar in die Richtung fehlender Farbunterscheidung. Die Farbart des Fehlfarbenrichtungsvektors wird durch den sogenannten "Fehlpunkt" charakterisiert. Er ist der Schnittpunkt der Farbtafel mit der Fehlfarbe. Nicht die Länge, sondern lediglich die Richtung des Differenzvektors $\vec{\Delta}$ ist typisch für die Fehlfarbe, wodurch die projektive Eigenschaft dieser farbmetrischen Größe zum Ausdruck kommt (s. B.1.). Der Differenzvektor $\vec{\Delta}$ (Fehlfarbenrichtungsvektor) stellt sich mathematisch wie folgt dar: $\vec{f} := \vec{\Delta} = (D_o - D_1) \vec{D} + (E_o - E_1) \vec{E} + (F_o - F_1) \vec{F}$. Abbildung 2 a zeigt die Darstellung der deuteranopischen Klein- und Großfeldfehlfarbe im dreidimensionalen Farbenraum unter Verwendung der "0,4-Normierung", Abbildung 2 b zeigt Klein- und Großfeldfehlfarbe in der "0,2-Normierung" (s. D.14.). Die Fehlfarben stellen das Bindeglied zwischen Dichromasie und Trichromasie dar; gleichzeitig ermöglichen sie durch ihre Lage in der Farbtafel eine Charakterisierung der Dichromasie. Die hier aufgezeigte Methode der Fehlfarbenbestimmung wurde bislang nur auf kleinem Gesichtsfeld angewandt. Das gleiche Prinzip habe ich ohne Einschränkung auf die Verhältnisse des 10°-Feldes übertragen.

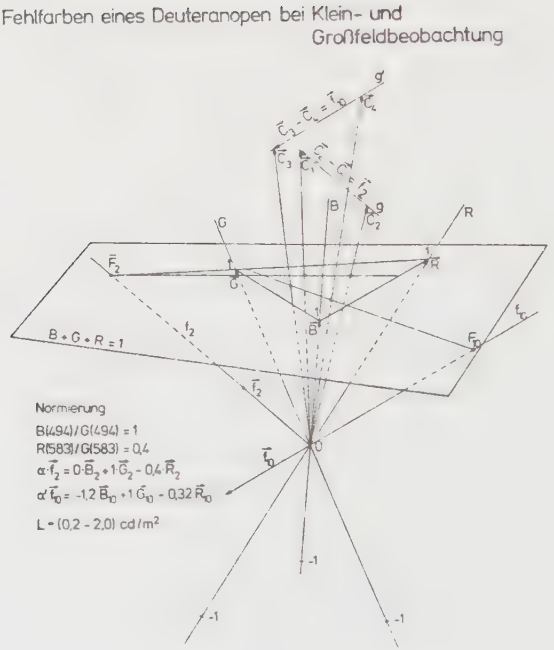


Abb. 2 a : Trichromatischer, von den Primärvalenzen $\vec{B}$, $\vec{G}$, $\vec{R}$ bzw. $\vec{B}_{10}$, $\vec{G}_{10}$, $\vec{R}_{10}$ aufgespannter Klein- bzw. Großfeldfarbenraum. In der Einheitsebene B + G + R = 1 ist die zugehörige Farbtafel eingezeichnet. Wie $\vec{C}_1$ und $\vec{C}_2$ im Kleinfeld (2°) für einen Deuteranopen ununterscheidbar sind, so sind es $\vec{C}_3$ und $\vec{C}_4$ für den gleichen Beobachter bei Großfeldbetrachtungsweise. Ihre Differenzvektoren $\vec{f}_2$ bzw. $\vec{f}_{10}$ sind Fehlfarbenrichtungsvektoren der Fehlfarben f_2 bzw. f_{10}. F_2 und F_{10} sind die zugehörigen Fehlpunkte. Beiden Systemen würde in dieser Darstellung die von Scheibner (100) vorgeschlagene "0,4-Normierung" zugrundegelegt.

Fehlfarben eines Deuteranopen bei Klein- bzw Großfeldbeobachtung

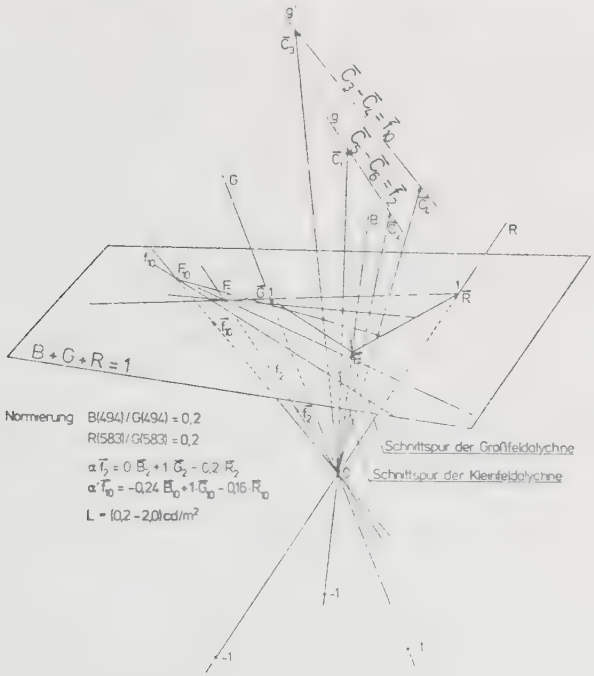


Abb. 2 b: In dieser Darstellung wurde von der "0,2-Normierung" Gebrauch gemacht. Weitere Erläuterungen in Abb. 2 a.

B.6. Reduktion der Trichromasie auf eine Deuteranopie

Ganz allgemein rührt die Verarmung der dichromatischen Farbenwelt daher, daß dem Dichromaten viele Farben gleich erscheinen, die für den Trichromaten deutlich verschieden sind (96). Um die Bedeutung des Fehlfarbenrichtungsvektors $\vec{f}_2$ bzw. $\vec{f}_{10}$ aus Abbildung 2 a im linearen Farbenraum herauszustellen, sind dort diese Vektoren auch vom Ursprung des Koordinatensystems aufgetragen (s. B.1.). Alle trichromatischen Farbvalenzen, deren vektorielle Differenz sich als Richtungsvektor der Fehlfarbe f_2 bzw. f_{10} ausdrücken läßt (je nach Betrachtungsweise), sind für den Dichromaten gleichaussehend oder äquivalent. Sie lassen sich daher zu einer Klasse zusammenfassen, die nun eine dichromatische Farbvalenz darstellt. Es liegt eine Klasseneinteilung vor, deren erzeugende Äquivalenzrelation eine im trichromatischen Raum V_3 erklärte dichromatische Metamerie-Relation ist. Die Menge aller dichromatischen Farbvalenzen bildet den dichromatischen Farbenraum V_2. Alle trichromatischen Farbvalenzen, deren Pfeilspitzen auf einer Geraden, die parallel zu f_2 bzw. f_{10} verläuft, enden, bilden eine solche Klasse, und die Gerade selbst kann als Zusammenfassung dieser Klasse und damit als unmittelbare Beschreibung der dichromatischen Farbvalenz aufgefaßt werden; derartige Geraden verhalten sich selbst wie Vektoren (98). Der Raum der dichromatischen Farbvalenzen ist zweidimensional. Die hier vorliegende Quotientenbildung von V_3 auf V_2 (s. B.1.) beruht auf der U-Äquivalenz bezüglich des Unterraums, der durch die Fehlfarbe aufgespannt wird. Die homomorphe natürliche Abbildung ω (s. B.1.) des linearen Raumes V_3 auf seinen Quotienten V_2 ist nach Abschnitt B.1. durch den Kern dieser Abbildung bestimmt! Dieser besteht aus all den Vektoren des Originalraumes V_3, die auf den Nullvektor des Bildraumes V_2 abgebildet werden. Die Gesamtheit dieser Vektoren stellt einen eindimensionalen Teilraum dar, der bei der Abbildung verschwindet. Den Kern des Homomorphismus nennt man Fehlfarbe f (96). Die Fehlfarbe f ist eine Gerade durch den Koordinatenursprung. Jeder Vektor parallel zur Fehlfarbe wird als Fehlfarbenrichtungsvektor bezeichnet (s. B.5.). Nach Abschnitt B.1. läßt sich der Homomorphismus $\omega: V_3 \rightarrow V_3/f$ äquivalent in folgender Form beschreiben:

$$(4)\quad \begin{pmatrix} K \\ W \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \end{pmatrix}}_{M} \cdot \begin{pmatrix} B \\ G \\ R \end{pmatrix}$$

wo K, W Farbwerte der dichromatischen Primärvalenzen $\vec{K}$ und $\vec{W}$, B, G, R Farbwerte der Primärvalenzen $\vec{B}$, $\vec{G}$ und $\vec{R}$ sind. Die α_{ij} sind als Koeffizienten der Matrix M Elemente aus dem skalaren Körper der reellen Zahlen. Die Abbildung ω ist nach Abschnitt B.1. allein durch ihren Kern bestimmt. Somit muß auch obige Abbildungsgleichung (4) allein unter der Voraussetzung, daß Kernω bekannt ist, lösbar sein. Zur Koeffizientenbestimmung der Matrix M ist es notwendig, die Basisvektoren des Raumes $V_2 = V_3/f$ zu definieren. Um eine möglichst einfache Matrix zu erhalten, habe ich folgende Definition vorgenommen:

$$(5)\quad \begin{aligned} \vec{K}_{10} &\overset{\text{def.}}{=} \omega\, \vec{B}_{10} \\ \vec{W}_{10} &\overset{\text{def.}}{=} \omega\, \vec{R}_{10} \end{aligned}$$

Nach Kowalsky (42) Satz 8.4. und 31.2. ist $\omega\vec{B}_{10}, \omega\vec{R}_{10}$) in der Tat eine Basis von V_2. Durch Einsetzen von (5) in (4) unter Beachtung von (1) erhält man:

$$(6)\quad \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{und}$$

$$(7)\quad \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{Daraus folgt:}$$

$$\alpha_{11} = 1 \quad ; \quad \alpha_{23} = 1$$

$$\alpha_{21} = 0 \quad ; \quad \alpha_{13} = 0$$

Die Abbildungsgleichung für den Fehlfarbenrichtungsvektor $\vec{f}$ lautet folgendermaßen:

(8) $$\begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_F \\ G_F \\ R_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Hieraus ergibt sich mit den Folgerungen aus (6) und (7)

$$B_F + \alpha_{12} G_F + 0 \cdot R_F = 0$$

$$\Rightarrow \quad \alpha_{12} = -\frac{B_F}{G_F}$$

$$0 \cdot B_F + \alpha_{22} G_F + R_F = 0$$

$$\Rightarrow \quad \alpha_{22} = -\frac{R_F}{G_F}$$

Damit sind alle Koeffizienten der Matrix M bekannt.

(9) $$\begin{pmatrix} K \\ W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -B_F/G_F & 0 \\ 0 & -R_F/G_F & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B \\ G \\ R \end{pmatrix}$$

B.7. Alychnen und Prinzip der Alychnenbestimmung

Verschiedenartige Strahlungen werden in der Photometrie als entweder gleichhell oder nicht gleichhell bewertet. Dem entspricht eine Klasseneinteilung von Strahlungsreizen nach einer Äquivalenzrelation "gleichhell wie" derart, daß Klassen, die verschiedenfarbige Metamerien darstellen und zugleich gemeinsam gleichhelle Strahlungsreize enthalten, zu neuen Klassen zusammengefaßt werden. Die trichromatische Partition ist also eine Verfeinerung der photometrischen Partition, und umgekehrt ist die photometrische Partition eine Vergröberung der trichromatischen Partition. Überträgt man die "gröberen" photometrischen Klassen in den Farbenraum und fordert zusätzlich, daß die Leuchtdichte L eine homogene lineare Funktion der Farbkomponenten ist, d. h. daß das empirisch bestimmte Abneysche Gesetz:
$L = \varrho \cdot R + \gamma G + \beta B$, in dem ϱ, γ und β "Leuchtdichtebeiwerte" heißen, gilt, so bildet jede dieser Klassen eine Ebene, Isolychne genannt, im Farbenraum. Bei einem festen Tripel von Leuchtdichtebeiwerten (ϱ, γ, β) und variabler Leuchtdichte L liegt eine Schar unter sich paralleler Isolychnenebenen vor, die Leuchtdichte ist also eindimensional (97). Diejenige "lichtlose" Isolychne, die den Nullpunkt des Farbenraumes enthält, heißt Alychne (105). Zur Festlegung einer Schar paralleler Isolychnen kommt es nur auf das Verhältnis des Leuchtdichtebeiwerte $\varrho : \gamma : \beta$ an. Alle Farbvektoren, deren Pfeilspitzen auf einer solchen

Ebene enden, fassen wir zu einer Klasse gleichheller Farben zusammen. Alle diese neuen Klassen bilden zusammen die eindimensionale Schar der Isolychnen, d. h. die photometrische Partition (97). Im linearen trichromatischen Farbenraum handelt es sich bei den Isolychnen um lineare Mannigfaltigkeiten der Dimension zwei (42, S. 32), die Alychne jedoch tritt als zweidimensionaler Unterraum dieses Farbenraumes in Erscheinung. Bei der Betrachtung im affinen Raum werden die Isolychnen zu affinen Unterräumen (s. B.1.). Im System des Farbmetrischen CIE Normalbeobachters von 1931 (18 a) liegt eine Zerlegung des dreidimensionalen Farbenraumes V_3 vor: $V_3 = A \oplus H$, (A = Alychne). Die Freiheit in der Festlegung von H ist so ausgenutzt, daß die den Teilraum H aufspannende Primärvalenz $\vec{Y}$, die also allein noch die Leuchtdichte trägt, ihren Farbort im grünen Gebiet außerhalb des Spektralfarbenzuges bekommt. Eine solche Primärvalenz heißt "virtuell". Außerdem sind die beiden in der Alychne liegenden Primärvalenzen ihrer Natur nach gleichfalls virtuell. Das hat zur Folge, daß alle Farbwerte nur positive Werte annehmen (97). Ähnlich liegen auch die Verhältnisse beim Farbmetrischen CIE Normalbeobachter 1964 (18 a). Die Parameterdarstellung einer beliebigen Isolychne als Ebene im dreidimensionalen Raum lautet: $\vec{C} = \vec{a}_1 + u\,\vec{B} + v\,\vec{E}$, wo $\vec{C}$ ein variabler Vektor ist, der als Ortsvektor in einem variablen Ebenenpunkt endet. $\vec{a}_1$ ist ein fester Ortsvektor, der in einem festen Punkt der Isolychne endet. $\vec{B}$ und $\vec{E}$ sind koplanare nicht parallele Vektoren, die in der Isolychne liegen. Es kommt also darauf an, zwei Vektoren zu finden, die koplanar, aber nicht parallel sind und als solche eine Isolychne aufspannen. Ein Richtungsvektor der Fehlfarbe f bietet sich geradezu an, die Rolle eines der beiden Vektoren zu übernehmen, da ununterscheidbare Farben auch gleichhell sind. Den anderen Vektor erhält man beispielsweise durch einen heterochromen Helligkeitsabgleich (81) einer Farbvalenz $\vec{a}_3$ mit der Ausgangsvalenz $\vec{a}_1$, wobei $\vec{a}_3$ auch für einen Deuteranopen von $\vec{a}_1$ farblich verschieden sein muß, um die Nichtparallelität beider Vektoren (des Fehlfarbenrichtungsvektors und des sog. Quervektors) zu gewährleisten. Den Differenzvektor $\vec{a}_1 - \vec{a}_3$ bezeichnet man als Quervektor $\vec{q}$ (102). Er liegt ebenfalls in der Isolychne, die somit durch den Richtungsvektor der Fehlfarbe $\vec{f}_{10}$ und den Quervektor $\vec{q}_{10}$ aufgespannt wird (s. Abb. 3). Der Quervektor ist ein reiner Chrominanzvektor (98), wo Chrominanz das farbmetrische Korrelat der Buntheit ist. Die Schwierigkeit bei solchen Abgleichen besteht darin, daß auch für den Dichromaten kein Farbabgleich zu erzielen ist. Dieses Prinzip der Alychnenbestimmung wurde auf kleinem Gesichtsfeld bereits erfolgreich durchgeführt. Grund genug, dieses Verfahren auch auf die Großfeldbetrachtungsweise auszudehnen und die Er-

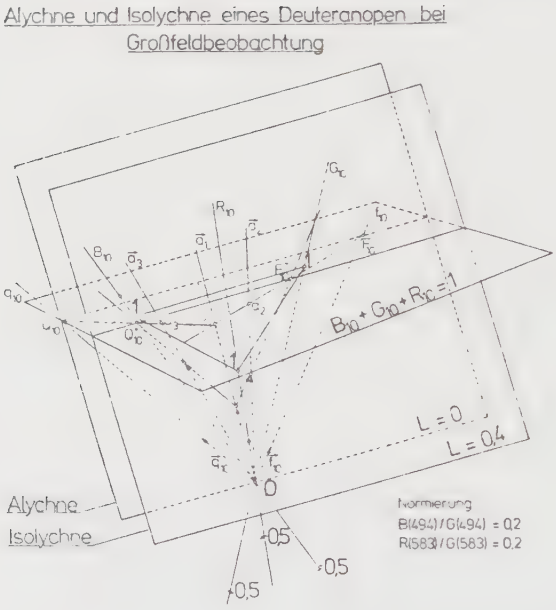


Abb. 3: Darstellung der deuteranopischen Alychne (B.7.) und einer Isolychne bei Großfeldbetrachtungsweise in der von mir modifizierten WDW-Normierung (D.14.). Im dreidimensionalen Farbenraum, gegeben durch die Einheitsvektoren $\vec{R}_{10}$, $\vec{G}_{10}$, $\vec{B}_{10}$, ist der Vektor $\vec{a}_1$ die Resultierende einer vektoriellen Addition aus drei Komponenten. Der Schnittpunkt mit der Einheitsebene ergibt den Farbort a_1 in der Farbtafel. Die Fehlfarbe f_{10} durchstößt die Einheitsebene im Fehlpunkt F_{10}. Die Differenz der Vektoren $\vec{a}_1 - \vec{a}_2$ ergibt den Fehlfarbenrichtungsvektor $\vec{f}_{10}$, der auch vom Nullpunkt abgetragen ist. Der Schnittpunkt der Verlängerung des Fehlfarbenrichtungsvektors $\vec{f}_{10}$, abgetragen vom Endpunkt des Vektors $\vec{a}_1$, mit der Farbtafel ist der Punkt F_{10}. Die Vektorsubtraktion $\vec{a}_1 - \vec{a}_3$ führt auf den Quervektor $\vec{q}_{10}$, dessen Verlängerung die Einheitsebene bei Q_{10} durchstößt. Vom Koordinatenursprung abgetragen schneidet die Verlängerung von $\vec{q}_{10}$ die Einheitsebene bei Q_{10}. Die lineare Hülle (42) der Vektoren $\vec{q}_{10}$, $\vec{f}_{10}$ ist ein zweidimensionaler Unterraum, die Alychne A. Die lineare Mannigfaltigkeit (42) $\vec{a}_1 + A$ stellt die Isolychne dar. Die Gerade durch die Punkte F_{10} und Q_{10} wird als Alychnenspur bezeichnet. Die Farbtafelebene ist durch die Lage der Einheisebene $B_{10} + G_{10} + R_{10} = 1$ dargestellt.

gebnisse zur Diskussion zu stellen.

B.8. Reduktion der Trichromasie auf eine Quasimonochromasie

Die homomorphe Abbildung φ des dreidimensionalen Farbenraumes V_3 auf das eindimensionale photometrische Maßsystem V_1 nach der Äquivalenzrelation der Gleichhelligkeit (s. B.7.) ist durch den Kern der Abbildung φ nach Abschnitt B.1. bestimmt. Dieser besteht aus all den Farbvektoren, die in der Alychne liegen und ist als Ebene ein Unterraum A der Dimension zwei. Die lineare Abbildung $\varphi : V_3 \rightarrow V_1$ ordnet den in der Alychne liegenden Vektoren den Nullvektor des eindimensionalen photometrischen Maßsystems V_1 zu. Alle anderen Farbvektoren, die also nicht in der Alychne liegen, werden auf die sogenannten Nebenklassen zum Kern abgebildet. Vom Standpunkt des linearen Raumes bildet die Gesamtheit der Nebenklassen mit dem Kern als Null die photometrische Partition oder den Quotientenraum V_3 / A oder das photometrische Maßsystem (97). Nach Abschnitt B.7. kann die Alychne z. B. durch den Fehlfarbenrichtungsvektor $\vec{f}$ und durch den Quervektor $\vec{q}$ aufgespannt werden. Jeder Vektor $\vec{C}$ in der Alychne läßt sich dann als Linearkombination dieser beiden Vektoren folgendermaßen darstellen:

(10) $\quad \vec{C} = u \cdot \vec{f} + v \cdot \vec{q} \quad ; \quad u,v \in \mathbb{R}$

Die vektoriellen Gleichungen von $\vec{f}$ und $\vec{q}$ in ihrer allgemeinen Form lauten:

(11) $\quad \vec{f} = B_F \vec{B} + G_F \vec{G} + R_F \vec{R}$

(12) $\quad \vec{q} = B_Q \vec{B} + G_Q \vec{G} + R_Q \vec{R}$

Die Parameterdarstellung (10) der Alychne beschreibt den Kern der Abbildung φ des dreidimensionalen Farbenraumes V_3 auf den Quotientenraum V_3 / A (s. B.1.), der nur noch Helligkeitsinformation enthält (102,96).

Die Abbildungsgleichung bezüglich der Basen $\vec{B}_{10}$, $\vec{G}_{10}$, $\vec{R}_{10}$ bzw. $\vec{L}$ lautet in Matrizenform:

(13) $$\begin{pmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B \\ G \\ R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L \end{pmatrix}$$

Die Festlegung der Koeffizienten α_1, α_2, und α_3, erfordert die Definition der Primärvalenz $\vec{L}$ in V_1. Um eine möglichst einfache Matrix zu erhalten, habe ich folgende Definition vorgenommen:

(14) $$\vec{L} \overset{\text{def.}}{=} \omega \frac{1}{G_F R_Q - R_F G_Q} \vec{B}_{10}$$

Durch Einsetzen von (14) in (13) unter Beachtung von (1) erhält man:

(15) $$\begin{pmatrix} \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{G_F R_Q - R_F G_Q} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \end{pmatrix}$$

$$\alpha_1 = G_F R_Q - R_F G_Q$$

Die Abbildungsgleichung für den Fehlfarbenrichtungsvektor $\vec{f}$ und den Quervektor $\vec{q}$ lautet dann:

(16) $$\begin{pmatrix} \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_F \\ G_F \\ R_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix}$$ und

(17) $$\begin{pmatrix} \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_Q \\ G_Q \\ R_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix}$$

Äquivalent dieser Schreibweise ist ein Gleichunssystem, das aus zwei Gleichungen mit jeweils zwei Unbekannten besteht und somit eindeutig lösbar ist. Es ergibt sich:

$$\alpha_2 = R_F B_Q - B_F R_Q$$

$$\alpha_3 = B_F G_Q - G_F B_Q$$

Setzt man die gefundenen Koeffizienten α_1, α_2, und α_3 in Gl. (13) ein, folgt die allgemeine Form der Abneyschen Gleichung:

(18) $$L = (G_F R_Q - R_F G_Q) B + (R_F B_Q - B_F R_Q) G + (B_F G_Q - G_F B_Q) R$$

Den Klammerausdrücken der Gl. (18) entsprechen die Leuchtdichtewerte β, γ und ϱ.

(19) $$L = \beta B + \gamma G + \varrho R$$

Die Anwendung dieser Gleichung auf die drei trichromatischen Spektralwertkurven $\bar{b}$, $\bar{g}$, $\bar{r}$ führt zu einer spektralen Hellempfindlichkeit (102). Unter welchen speziellen Voraussetzungen eine Reduktion der Trichromasie auf eine Quasimonochromasie bzw. Dichromasie bei Großfeldbetrachtung sinnvoll erscheint, wird Gegenstand der Erörterung sein.

B.9. Farbart, Farbwertanteile und Farbtafel; Berechnung der Schnittspur der Alychne mit der Farbtafel

Die Eigenschaft, die den Farbvalenzen gemeinsam ist, die sich nur durch die Helligkeit unterscheiden, nennt man die Farbart (s. B.2.). Die Farbart drückt sich aus im Verhältnis der drei Farbwerte, man kann sie aber auch direkt angeben durch die Farbwertanteile r, g und b, die sich einfach aus den Farbwerten berechnen lassen:

$$r = \frac{R}{R + G + B} \qquad g = \frac{G}{R + G + B} \qquad b = \frac{B}{R + G + B}$$

Die Summe der drei Farbwertanteile ist aufgrund dieser Definition immer eins ($r + g + b = 1$). Es genügt zur Kennzeichnung einer Farbart also die Angabe von nur zwei Farbwertanteilen, aus denen sich der Dritte sofort berechnen läßt. Da eine Farbart durch zwei unabhängige Zahlen, zwei Farbwertanteile, bestimmt ist, liegt es nahe, eine Darstellung in der Ebene anzustreben. Die Farbwertanteile lassen sich affin als baryzentrische Koordinaten (77) interpretieren. Die Farbtafel kann als projektiver Raum P aufgefaßt werden. Unter einem projektiven Raum P über $\mathbb{R}$ versteht man die Menge aller eindimensionalen Unterräume eines Vektorraumes X über $\mathbb{R}$ (42, S. 177). Das Hauptinteresse gilt jetzt nicht mehr den Vektoren, sondern den eindimensionalen Unterräumen von X, die als Punkte eines neuen, eben des projektiven Raumes aufgefaßt werden sollen. Farbvalenzen gleicher Helligkeit werden im projektiven Raum auf ein und denselben Punkt abgebildet. Dieser Punkt charakterisiert die Farbart. Der "projektive BGR-Farbenraum" besteht aus der Gesamtheit der geordneten nicht-trivialen 4-tupel $(\xi_0;\xi_1;\xi_2;\xi_3) = \left\{ \frac{1}{R + G + B} ; \frac{R}{R + G + B} ; \frac{G}{R + G + B} ; \frac{B}{R + G + B} \right\}$.
Die Zahlen ξ_i heißen homogene Koordinaten des Punktes $P = (\xi_0;\xi_1;\xi_2;\xi_3)$.
Ist P ein eigentlicher Punkt (112, S. 155) und $x_i = \xi_i / \xi_0$ $(i = 1, 2, 3)$, d. h. im affinen R_n demnach $P = (x_1, x_2, x_3)$, dann nennt man die $(x_1, x_2, x_3) = (B, G, R)$ affine oder inhomogene Koordinaten von P zum Unterschied von den homogenen Koordinaten ξ_i (112, S. 159).
In der Farbtafel ordnen wir die drei Primärvalenzen als Eckpunkte eines Dreiecks an. Die Gestalt dieses Farbdreiecks kann beliebig sein, allerdings sollen die drei Punkte nicht auf einer Geraden liegen (wegen der linearen Unabhängigkeit der drei Primärvalenzen). Die Farbtafel kann als Einheitsebene im B, R, G - Farbenraum aufgefaßt werden, die der Gleichung

(20) $\qquad R + G + B = 1$ gehorcht. Diese Ebene schneidet die Raumachsen

in den Einheitspunkten (1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1). Die Alychnengleichung beschreibt ebenfalls eine Ebene im Farbenraum, die aber i. a. zur Einheitsebene nicht parallel verläuft. Gesucht wird die Gerade, in der sich die beiden Ebenen schneiden. Man nennt diese Gerade die Alychnenspur. Die Gleichung der Alychne lautet:

(21) $0 = \beta B + \gamma G + \varrho R$

Aus Gleichung (20) folgt:

(22) $B = 1 - R - G$, Gleichung (22) eingesetzt in Gl. (21) ergibt:

(23) $0 = \beta(1 - G - R) + \gamma G + \varrho R$

Dies ist die Gleichung einer Geraden in der Einheitsebene. Da die Farbtafel als Einheitsebene im B, G, R - Farbenraum aufgefaßt werden kann, ist der Übergang von den Farbwerten B, G, R zu den Farbwertanteilen b, g, r, möglich:

(24) $0 = \beta - \beta g - \beta r + \gamma g + \varrho r$

$$g = \frac{\beta - \varrho}{\gamma - \beta} \cdot r - \frac{\beta}{\gamma - \beta}$$

Dies ist die Gleichung einer Geraden in der Farbtafel von der allgemeinen Form: $y = m x + b$.

P.10. Der Konvergenz-Abgleich

Die fehlende Additivität bei trichromatischen Farbabgleichen in ausgedehnten Feldern verlangt eine neue Farbabgleichsmethode, die zu einer linearen Metrik führt (132). Stiles (120) zeigte schon 1955, wie sich ein trichromatischer Farbabgleich auf einem 10° - Gesichtsfeld in Abhängigkeit von der Leuchtdichte ändert. Um einer Stäbcheneinmischung aus dem Weg zu gehen, wählten Stiles, Burch und Speranskaja zur Aufstellung der Großfeldspektralwertkurven hohe Leuchtdichten (120,111). Um so mehr hat ein Großfeldabgleich auf mesopischem Leuchtdichteniveau die Stäbchenaktivierung zu berücksichtigen. Damit wird offensichtlich ein weiterer Freiheitsgrad, sprich eine vierte Primärvalenz, erforderlich. Der übliche trichromatische Farbabgleich auf großem Feld ist weder unpräzise noch schwer ausführbar (132); die erzielte Gleichheit ist jedoch insofern verzerrt, als die Stäbchenvalenz (47) beider Photometerhälften unterschiedlich ist. Eine Änderung des Leuchtdichteniveaus beeinflußt die Stäbchenaktivierung in beiden Gesichtsfeldhälften in ungleicher Weise. Der Grund dafür, daß ein trichromatischer Großfeldfarbabgleich auf mesopischem Niveau überhaupt möglich ist, obschon vier

verschiedene Pigmente (Erythrolab, Chlorolab, Cyanolab und Rhodopsin) am Abgleich teilhaben, liegt wahrscheinlich in der Eigenart der Verschaltung der vier Rezeptortypen auf neuronaler Ebene. Es gibt Hinweise dafür, daß die Stäbchenaktivität nicht in gleichem Maße mit den drei Zapfenmechanismen in Beziehung steht, sondern die blauen Zapfen bevorzugt. Weil das Stäbchen-Zapfen-Erregungsverhältnis bei niedrigem Leuchtdichteniveau größer ist, tritt auch die Abgleichsverzerrung bei niedrigerer Leuchtdichte stärker hervor. Aguilar und Stiles (2) stellten fest, daß sogar bis hin zu hohen Leuchtdichten Stäbchenreizungen zu verzeichnen sind. In einem System, in dem vier Bedingungen Genüge getan werden muß, sind, wie schon oben gesagt, vier Bezugsvalenzen erforderlich. Es gibt sicherlich eine ganze Reihe auf Experimentierniveau akzeptable tetrachromatische Abgleiche. Das Problem besteht jedoch darin, einen Abgleich zu finden, der eine abgeglichene Stäbchenaktivität beider Gesichtsfeldhälften garantiert. Der tetrachromatische Abgleich mit dem Ziel der beidseitigen Stäbchenvalenzanpassung wurde zuerst von Bongard et alii (12) 1958 erprobt. 1970 stellten Palmer (74) und Trezona (131) je eine Methode zum tetrachromatischen Farbabgleich vor. Trezonas Vorschlag strebt auf direktem Weg den vierdimensionalen Abgleich an. In Analogie zu Trezonas tetrachromatischem Abgleich für normale Trichromaten habe ich trichromatische Abgleiche von Dichromaten auf großem Feld ausführen lassen. Dieser trichromatische Abgleich für Dichromaten besteht aus zwei Anteilen, einem modifizierten dichromatischen Abgleich auf mesopischem Experimentierniveau und einem Helligkeitsabgleich, der nur knapp unterhalb der Zapfenschwelle auf skotopischem Niveau eingestellt wird. Zwei Geräteprimärvalenzen sind erforderlich für die erste Art des Abgleichs und eine, deren Wellenlänge möglichst nahe beim Maximum der $V'(\lambda)$ - Kurve liegen sollte, für die zweite Art des Abgleichs. Bereits 1971 stellte Palmer (74 b) fest, daß dreidimensionale Abgleiche (im Sinne des Konvergenz-Abgleichs) seiner deuteranopischen Versuchspersonen v. a. im mesopischen Bereich nicht leuchtdichteinvariant waren. Die iterierende Einstellung von Farb- und Helligkeitsabgleich konvergiert schon nach kurzer Zeit gegen einen Abgleich, der auf beiden Helligkeitsniveaus Gültigkeit hat. Diesen Abgleich bezeichne ich als Konvergenz-Abgleich.

B.11. Der dichromatische Großfeldfarbenraum

Trezona (133) hat mehrfach die Linearität des tetrachromatischen Großfeldfarbenraumes unter Beweis gestellt. Es liegt deshalb nahe, auch dem Großfelddichromaten einen weiteren Feiheitsgrad (eine dritte Dimension) zuzugestehen, um eine lineare Metrik dieser Gruppe von Farbenfehlsichtigen zu begründen. Eine andere Möglichkeit, dem Großfeldfarbenraum des Dichromaten innerhalb bestimmter Schranken Linearitätseigenschaften angedeihen zu lassen besteht darin, "Teilräume" (=: beschränkte Farbenräume) des dichromatischen Farbenraumes an lineare Gesetzmäßigkeiten zu binden, indem man Farbvalenzen und deren lineare Operationen jeweils innerhalb eines engen Leuchtdichtebereichs betrachtet. Jede Farbvalenz innerhalb dieses Leuchtdichtebereichs kann in gewisser Annäherung als Linearkombination zweier Primärvalenzen $\vec{K}$ und $\vec{W}$, deren Endpunkte ebenfalls in diesem Leuchtdichtebereich liegen sollten, dargestellt werden. Der dichromatische Kleinfeldfarbenraum (2°) entsteht aus dem trichromatischen Kleinfeldfarbenraum (2°) durch Quotientenbildung nach der Fehlfarbe f (s. B.6.). Auf Großfeldverhältnisse (10°) übertragen heißt das: Der dichromatische "beschränkte Großfeldfarbenraum" entsteht aus dem trichromatischen beschränkten Großfeldfarbenraum durch Quotientenbildung nach der Fehlfarbe f_{10}, die durch Farbabgleiche, die photometrisch in jenem Leuchtdichteintervall liegen, ermittelt werden kann. Ähnlich wie dem dreidimensionalen Raum der trichromatischen Farbvalenz V_3 ein zweidimensionaler projektiver Raum der trichromatischen Farbarten P_2 zugeordnet werden kann, gilt auch eine entsprechende Zuordnung zwischen dem zweidimensionalen Raum der dichromatischen Farbvalenzen V_2 und einem eindimensionalen projektiven Raum ("Punktreihe") der dichromatischen Farbarten P_1 bei Kleinfeldbetrachtung. Projiziert man die zur Fehlfarbe f gehörenden Nebenklassen vom Ursprung des Raumes V_3 auf die Farbtafel, erhält man ein ebenes Geradenbüschel, das im Fehlpunkt F zusammenläuft. Der Punkt F heißt auch Träger des Geradenbüschels. Ein solches Geradenbüschel kann als eindimensionaler Raum P_1 der dichromatischen Farbarten aufgefaßt werden (96). Für den tri- bzw. dichromatischen Großfeldbeobachter gilt im Prinzip das gleiche, nur mit dem Unterschied, daß die Beschaffenheit des zugehörigen projektiven Farbenraumes, der "Anstrich" der Farbtafel, vom Leuchtdichtebereich abhängig ist. Zur Veranschaulichung von P_1 denke man sich einen zweidimensionalen Raum V_2, der von den beiden Grundvektoren $\vec{K}_{10}$ und $\vec{W}_{10}$ aufgespannt wird. Durch deren Endpunkt sei die "Punktreihe" P_1 gelegt, auf die alle Vektoren (dichromatische Farbvalenzen)

konstanter Richtung aber verschiedener Länge (Helligkeit) abgebildet werden (96). Ein Punkt der Geraden beschreibt somit die dichromatische Farbart einer Klasse von dichromatischen Farbvalenzen. Wir nennen diese Gerade auch binäre Mischungsgerade. Ihre Gleichung im Raum V_2 lautet: $K_{10} + W_{10} = 1$, wo K_{10}, W_{10} dichromatische Farbwerte bezüglich der Primärvalenzen $\vec{K}_{10}$, $\vec{W}_{10}$ sind. Die "intervallweise" Reduktion (innerhalb bestimmter Leuchtdichtegrenzen) eines dreidimensionalen Großfeldfarbenraumes auf einen Zweidimensionalen führt von den trichromatischen Farbwerten B_{10}, G_{10}, R_{10} zu den dichromatischen Farbwerten K_{10}, W_{10}. Die entsprechende Abbildungsgleichung, wegen der Abhängigkeit der Fehlfarbe f_{10} von der Leuchtdichte auf einen bestimmten Leuchtdichtebereich (dem mesopischen) abgestimmt, (s. B.6.), sieht folgendermaßen aus:

$$(25)\qquad \begin{pmatrix} K_{10} \\ W_{10} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & -B_{F_{10}}/G_{F_{10}} & 0 \\ 0 & -R_{F_{10}}/G_{F_{10}} & 1 \end{pmatrix}}_{M} \begin{pmatrix} B_{10} \\ G_{10} \\ R_{10} \end{pmatrix}$$

Die Matrix M ist nach Lingenberg (54) und nach den Ausführungen des Abschnitts B.1. gerade die transponierte der zur Abbildung bezüglich der Basen $\vec{B}_{10}$, $\vec{G}_{10}$, $\vec{R}_{10}$ und $\vec{K}_{10}$, $\vec{W}_{10}$ gehörigen Matrix M* ($M = M^{*T}$). Daraus folgt nach B.1.:

$$(26)\qquad \begin{pmatrix} B_{10} \\ G_{10} \\ R_{10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -B_{F_{10}}/G_{F_{10}} & -R_{F_{10}}/G_{F_{10}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_{10} \\ W_{10} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} K_{10} \\ (-B_{F_{10}} K_{10} - R_{F_{10}} W_{10}) / G_{F_{10}} \\ W_{10} \end{pmatrix}$$

C. Aufgabenstellung

1 a) Es sollen Fehlfarben zweier "klassisch" diagnostizierter Deuteranopen auf kleinem Gesichtsfeld (2°) foveal bei mesopischen Leuchtdichten gemessen werden.

b) Es soll die Existenz deuteranopischer Fehlfarben derselben Versuchspersonen auf großem zentral fixiertem Gesichtsfeld (10°) bei mesopischem Leuchtdichteniveau untersucht und - falls vorhanden - deren spezielle Lage im Farbenraum gemessen werden.

c) Bei Existenz einer mesopischen Großfeldfehlfarbe f_{10} soll diese als Kern einer homomorphen Abbildung eines dreidimensionalen auf einen zweidimensionalen Farbenraum (innerhalb gewisser Schranken) aufgefaßt werden und zur Aufstellung mesopischer deuteranopischer Großfeldspektralwertkurven führen.

2) Es sollen deuteranopische Alychnen des 10°-Feldes (sofern es sie gibt) bei mesopischem Lechtdichteniveau bestimmt werden. Sie stellen den Kern einer homomorphen Abbildung eines dreidimensionalen Farbenraumes auf einen eindimensionalen Helligkeitsraum innerhalb eines bestimmten Leuchtdichtebereichs dar. Eine solche Reduktion soll zur Aufstellung einer mesopischen Hellempfindlichkeitsfunktion eines Deuteranopen benutzt werden.

3) Die Ergebnisse der Fehlfarben- und Alychnenbestimmung sollen in das System des Farbmetrischen Normalbeobachters transformiert werden.

4) Es soll die Existenz und die Durchführbarkeit dreidimensionaler "Konvergenz-Abgleiche" für Deuteranope gezeigt werden und ihre Bedeutung innerhalb der Großfeldfarbanpassung erörtert werden.

5) Die Hypothese, einer dichromatischen Farbvalenz entspreche genau ein Konvergenz-Abgleich, soll untersucht werden.

D. Methodik

D. 12. Versuchspersonen

Zu den Versuchspersonen zählten ein 22-jähriger Soziologiestudent W. F., der infolge eines Unfalls sein linkes Auge verloren hatte und ein 65 Jahre alter Rentner O. M.. Die Diagnose der Farbenfehlsichtigkeit wurde mit dem Nagelschen Anomaloskop (gemäß der FNF Anweisung (20)) gestellt. Danach erwiesen sich beide Versuchspersonen als sichere Deuteranopen. Zudem wurden die Dunkeladaptationskurven beider Versuchspersonen mit einem Goldmann/Weekers-Adaptometer aufgenommen, um eine Hemeralopie auszuschließen (s. Abb. 4 a u. b)*. Dabei zeigten sich keine größeren Abweichungen von den altersgemäßen Standardkurven, die der hiesigen Universitätsaugenklinik zum Vergleich entliehen wurden.

D. 13. Apparatur

Die Versuche wurden mit einem modifizierten Dreifarbenmeßgerät nach Guild-Bechstein (6) (Hersteller: Schmidt u. Haensch, Berlin) durchgeführt. Abbildung 5 zeigt schematisch den Aufbau des Gerätes. Für sämtliche Versuche wurde ein Großfeldokular verwendet, das dem Beobachter ein kreisrundes zweigeteiltes Gesichtsfeld von 10° Gesichtswinkel darbot. Durch Einschieben einer Gesichtsfeldblende GB (Ø = 1,2 mm) konnte der Gesichtswinkel von 10° auf 2° reduziert werden. Für die Durchführung der Versuche wurde die Spiegelplatte SP entfernt. Die verschiedenen Ausgangsreize im rechten Photometerfeld kamen durch Zusammenwirken des kalibrierten Interferenzverlaufsfilters mit der Wechseloptik W zustande, in deren Strahlengang das Absorptionsfilter BG 3/1 der Dicke 2 mm (Hersteller: Schott u. Gen., Mainz) unmittelbar hinter L_1 eingebracht war. Die Intensität der überlagerten Strahlung konnte durch Graufilter verschiedener optischer Dichten, die zwischen L_2 und U_3 eingeschoben wurden, variiert werden. Die linke Photo-

* Dank an Dr. Bischof für die freundliche Anweisung am Adaptometer

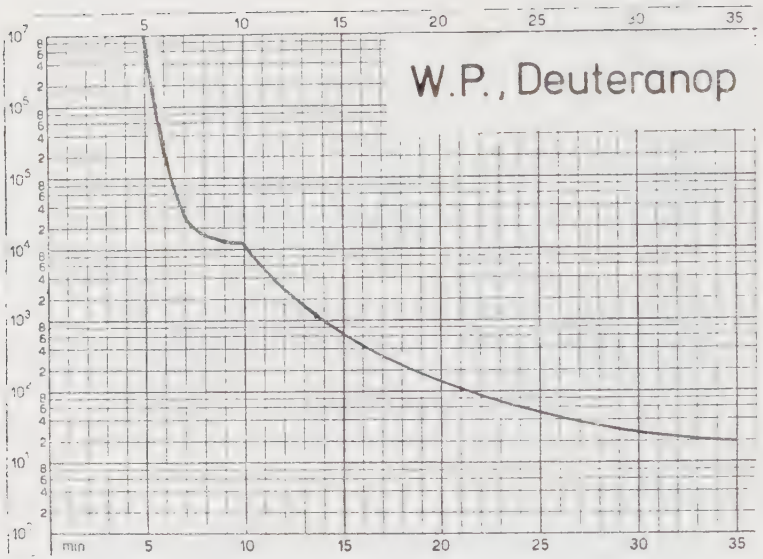


Abb. 4 a: Verlauf der Dunkeladaptation von W. P. (22 J.). Die Kurve wurde nach einer fünfminütigen Blendung der Versuchsperson aufgenommen.

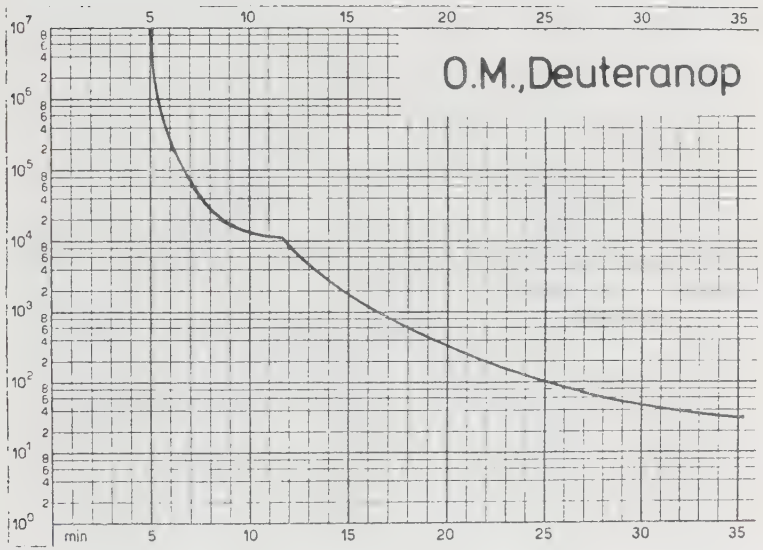


Abb. 4 b: Verlauf der Dunkeladaptation von O.M. (65 J.). Die Kurve wurde nach einer fünfminütigen Blendung der Versuchsperson aufgenommen.

meterhälfte wurde über das rotierende Prismensystem RP ausgeleuchtet. Die instrumentellen Primärvalenzen wurden mit Hilfe von Farbfiltern durch eine gemeinsame Glühlampe G erzeugt, die additive Mischung dieser drei Lichter erfolgte durch ein rotierendes Prismensystem RP, also nach dem Kreiselprinzip (6). Zur Vermeidung von Großfeldinhomogenitäten wurde an die Stelle der Spiegelplatte SP eine Mattscheibe SS3 (Nr. 390005, Dicke 2 mm) in den Probenstrahlengang gebracht. Aus dem gleichen Grund wurde im Mischungsstrahlengang statt der Mattscheibe SS1 eine stärker streuende Opalglasscheibe SS1* "Trübglas orig." benutzt. Die Technik des Konvergenz-Abgleichs (s. B. 10) erfordert eine nichtselektive Intensitätsabschwächung im Proben- und Mischungsstrahlengang. Diesem Verlangen konnte ich nur teilweise gerecht werden. Die Herabsetzung der Intensität des Probenstrahlenganges gelang durch zwei nichtselektive Siebe, die zwischen SP und L_2 hintereinander eingefügt wurden, um den Faktor 36, und am Brodhun-Sektor ebenfalls nichtselektiv um den Faktor 10, insgesamt also um den Faktor 360. Im Mischungsstrahlengang bewirkten ein nicht ganz neutrales Graufilter der optischen Dichte eins (2 mm Dicke, Hersteller Schott u. Gen., Mainz) und zwei nichtselektive Siebe des Schwächungsfaktors 6 x 6 = 36 vor der Opalglasscheibe SS1* den Sprung in den skotopischen Leuchtdichtebereich. Der Entsättigungsstrahlengang wurde nicht benutzt. Die Primärvalenzfilter waren Interferenzfilter (Hersteller: Jenaer Glaswerk, Schott u. Gen., Mainz). Für Blau und Grün wurden Doppelbandfilter des Typs D E P A L,

a) λ_{max} = 459 nm; HW = 18 nm
b) λ_{max} = 458 nm; HW = 18 nm
c) λ_{max} = 531 nm; HW = 16 nm
d) λ_{max} = 531 nm; HW = 16 nm

für Rot Bandfilter des Typs PAL

e) λ_{max} = 652 nm; HW = 22 nm
f) λ_{max} = 652 nm; HW = 21 nm

benutzt.

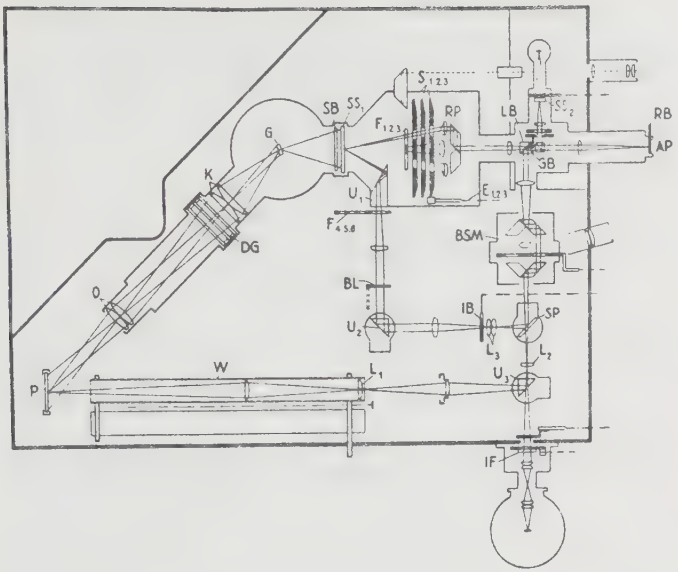


Abb. 5: Modifiziertes Dreifarbenmeßgerät nach Guild-Bechstein (6). Erläuterung der Abkürzungen: AP-Austrittspupille, B1-Blende, BSM-Brodhun-Sektorenmeßvorrichtung, DG-Davis-Gibson-Filter, $E_{1,2,3}$-Triebknöpfe, $F_{1,2,3}$-Farbfilter, $F_{4,5,6}$-Farbfilter, G-Wolfram-Halogen-Glühlampe, GB-Gesichtsfeldblende, IB-Irisblende, IF-Interferenzverlaufsfilter, K-Kondensor, L_1, L_2, L_3-Linsen, LB-Lummer-Brodhun-Würfel, O-Objektiv, P-Probe, RB-Revolverblende, RP-rotierendes Prismensystem, $S_{1,2,3}$-Sektorenpaare, SB-Siebplatte, SP-Spiegelplatte, SS_1, SS_2-Streuscheiben, U_1, U_2, U_3-Umlenkprismen, W-Wechseloptik.
Der sog. "Entsättigungsstrahlengang" führt über die Umlenkprismen U_1 und U_2. Der "Probenstrahlengang" wird über P und U_3 umgelenkt. Die Spiegelplatte SP kann wahlweise durch einen Mischwürfel M ersetzt werden, der die beiden Strahlengänge vereinigt.

Angestrebt waren ursprünglich die Wellenlängen 460 nm, 530 nm und 650 nm, um das Wrightsche Primärvalenzsystem benutzen zu können (148). Die kleinen Abweichungen in den Wellenlängen wurden vernachlässigt, so daß die Primärvalenzen $\vec{D}$ (460), $\vec{E}$ (530) und $\vec{F}$ (650) nach der Normierung $\vec{B}$ (460), $\vec{G}$ (530) und $\vec{R}$ (650) genannt wurden (101).

D. 14. WDW-System und spezielle deuteranopische Normierungen

Durch die Geräteprimärvalenzen $\vec{D}$ (460), $\vec{E}$ (530) und $\vec{F}$ (650) wird ein dreidimensionaler Farbenraum aufgespannt. Bei Verwendung des kleinen Gesichtsfeldes (2°) (10°-Okular mit Gesichtsfeldblende $\emptyset$= 1,2 mm) hat der Farbenraum die Eigenschaften eines Vektorraumes; bei Großfeldbetrachtung aber bleibt das Additivitätskonzept nur innerhalb eines gewissen Leuchtdichtebereichs annähernd gewahrt. Die bloß lokale Natur der Linearität macht offenbar den Umgang mit dem Großfeld bei Zugrundelegung dreier Primärvalenzen so beschwerlich. Beide Farbenräume berücksichtigen die interindividuellen Sehpigmentvariationen ebensowenig wie die unterschiedliche Makulapigmentierung und Absorption der inneren Augenmedien, insbesondere der Linse (84). Wright (148) geht in seinem WDW-System diesen Einflüssen auf folgende Weise aus dem Weg: Er mischt eine gelbe (583 nm) Spektralfarbvalenz durch die Primärvalenzen $\vec{E}$ (530) und $\vec{F}$ (650)(Rayleighgleichung) und eine blaugrüne Spektralfarbvalenz (494 nm) durch die Primärvalenzen $\vec{D}$ (460) und $\vec{E}$ (530)(Trendelenburggleichung) nach. Mit dem Quotienten E/D (494) multipliziert er D und mit E/F (583 nm) F. Dies entspricht folgender Farbwerttransformation:

$$(27) \qquad \begin{pmatrix} B \\ G \\ R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E/D\ (494\ nm) & & \\ & 1 & \\ & & E/F\ (583\ nm) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D \\ E \\ F \end{pmatrix}$$

Die spezielle Transformation $\vec{D}, \vec{E}, \vec{F} \rightarrow \vec{B}, \vec{G}, \vec{R}$ bzw. $\vec{D}_{10}, \vec{E}_{10}, \vec{F}_{10} \rightarrow \vec{B}_{10}, \vec{G}_{10}, \vec{R}_{10}$ bezeichnet man auch als Normierung, da die Richtung der Achsen des Parallelkoordinatensystems $\vec{D}, \vec{E}, \vec{F}$ bzw. $\vec{D}_{10}, \vec{E}_{10}, \vec{F}_{10}$ nicht verändert, sondern nur eine sinnvolle Festlegung der Achseneinheiten vorgenommen wird. Eine derartige Normierung (auch 1 : 1 Normierung genannt) eignet sich jedoch weniger für die zeichnerische Darstellung deuteranopischer Fehlfarben auf

kleinem Feld (148). Die Lage der Großfeldfehlpunkte in der 1 : 1 Normierung erfordert ebenfalls eine Änderung der Wrightschen Normierung. Eine zeichnerisch einfachere Darstellung der deuteranopischen Fehlpunkte des Großfeldes und des Kleinfeldes gelingt, wenn man die Gewichtung von roter zu grüner Primärvalenz einerseits und blauer zu grüner Primärvalenz andererseits sinnvoller vornimmt. Da grundsätzlich Freiheit in der Normierung besteht, wählte ich für das Kleinfeld die von Scheibner (100) vorgeschlagene Normierung R/G (583) = 0,4 und B/G (494) = 1. Diese Normierung nenne ich N1. Für den Großfeldfarbenraum wählte ich folgende empirisch gefundene Gewichtung der Primärvalenzen:
R_{10} / G_{10} (583) = 0,2 und B_{10} / G_{10} (494) = 0,2, welche ich mit N2 bezeichne.

D. 15. Messung von Leuchtdichten; Kalibrierung des DFM; Umrechnung ins CIE-System

a) Messung von Leuchtdichten

Bewertet man eine Strahlung photometrisch, also nach der spektralen Hellempfindlichkeit des Auges, so ist nach Auffassung der klassischen Photometrie (81) die Leuchtdichte die bei normalen Sehbedingungen für die erzielte Erregung und damit auch für den Helligkeitseindruck maßgebende Größe. Ihre Einheit ist das Candela/m^2. Die Leuchtdichte korrespondiert mit der Strahldichte und ist als solche nicht eine an eine Leuchtfläche bestimmter Abmessungen gebundene Größe, sondern eine Eigenschaft der Strahlung als solcher (81). Zur Bestimmung des Experimentierleuchtdichteniveaus habe ich die Leuchtdichten der zehn Farbreize gemessen, die als Testreize der Fehlfarbenbestimmung zugrundelagen. Die Leuchtdichten der Testreize, die konvergierend abgeglichen wurden, habe ich um den Faktor vier größer gewählt. Außerdem wurde die Leuchtdichte der Normvalenz VG 12 (Absorptionsfilter der Dicke 2 mm) bestimmt. Die Messung der Leuchtdichten erfolgte mit Hilfe eines Bechsteinschen Leuchtdichtemessers nach einem heterochromatischen Helligkeitsabgleich (81), indem die Helligkeit der Lichtquelle des Leuchtdichtemessers der Helligkeit des Testreizes (aus dem DFM) auf einem zweigeteilten Photometerfeld angeglichen wurde.

Zur Kalibrierung des Bechsteinschen Leuchtdichtemessers wurde die Beleuchtungsstärke einer vor dem Fenster liegenden Magnesiumoxidplatte mit einem daneben liegenden Luxmeter (Hersteller: Hartmann u. Braun) gemessen. Anschließend wurde die von der Magnesiumoxidplatte remittierte Leuchtdichte mit dem Bechsteinschen Leuchtdichtemesser gemessen. Dabei spielt der Winkel, unter dem die Magnesiumoxidplatte durch den Leuchtdichtemesser betrachtet wurde, keine Rolle, da es sich um eine vollkommen gestreute Reflexion handelt. Aufgrund der Tatsache, daß die Reflexion der Magnesiumoxidplatte keine gerichtete Komponente besitzt, besteht Proportionalität zwischen einer auf sie eingestrahlten Beleuchtungsstärke und der in einer bestimmten Richtung abgestrahlten Leuchtdichte (50, S. 182 ff.). Aus dem photometrischen Grundgesetz

(28) $\Phi = \int_{A} \int_{\omega} L \cdot \cos \varepsilon \; dA \cdot d\omega$ (wo Φ der Lichtstrom, ω der von der Leuchtdichtemesseröffnung aufgespannte Raumwinkel, ε der Abstrahlungswinkel zwischen der Flächennormalen und der Geraden, die in Richtung Leuchtdichtemesser zeigt, und A die beleuchtete Fläche der Magnesiumoxidplatte ist), ergibt sich die gesuchte Beziehung zwischen Leuchtdichte L und Beleuchtungsstärke E:

(29) $E = \frac{d\Phi}{dA} \overset{(28)}{=} \int_{\omega} L \cdot \cos \varepsilon \; d\omega(\varepsilon)$

$= L \int_{2\pi} \cos \varepsilon \; d\omega(\varepsilon) = L \pi \cdot sr \Longrightarrow$

(sr = Steradiant = Einheit des Raumwinkels)

(30) $L = \frac{E}{\pi \cdot sr}$

Am Dreifarbenmeßgerät wurden die Leuchtdichten der Farbreize bei entferntem Okular bei abgeglichenem DFM-Photometerfeld heterochrom mit dem Bechsteinschen Leuchtdichtemesser gemessen. Die Werte erstreckten sich zwischen 0,23 cd/m² für Farbreize mit überwiegend kurzwelliger Strahlung und 1,64 cd/m² für Farbreize, deren Farbreizfunktion im wesentlichen durch den Verlauf im langwelligen Bereich charakterisiert war. Mit dem Absorptionsfilter VG 12 im Probenstrahlengang des DFM ergab sich eine Leuchtdichte von 2,48 cd/m². Der von der Netzhaut bewirkte Helligkeitseindruck hängt

auch von der Größe der Augenpupille ab (18 c). Die Pupillenlichtstärke

(31) $I_p = L \cdot A_p$

(A_p = Pupillenfläche) ist an Stelle der Leuchtdichte L vor allem dann zur Kennzeichnung des Helligkeitseindruckes zu benutzen, wenn - wie in unserem Fall - mit künstlich begrenzter Pupille beobachtet wird. Die Einheit der Pupillenlichtstärke ist das Troland. Der von der Netzhautbeleuchtung bewirkte Helligkeitseindruck hängt im photopischen Sehen außer von den oben angeführten Einflüssen auch noch vom "Stiles-Crawford-Effect" (Richtungseffekt) erster Art (123) ab. Dieser Effekt ist eine Funktion des Pupillendurchmessers d und kann als Faktor s berücksichtigt werden, der in Gleichung (31) eingefügt wird. Die so entstehende "reduzierte Pupillen-Lichtstärke" I_p' ist dann gegeben durch:

(32) $I_p' = s\, I_p$.

Der Faktor s wird durch die von Moon und Spencer (64) eingestellte Zahlenwertgleichung in guter Näherung dargestellt. Bei einem Durchmesser der Pupille des 10°-Okulars von 1,6 mm ergibt sich für den Faktor s der Wert: 0,9861. Die reduzierte Pupillenlichtstärke I_p', die bei Fehlfarbenermittlung und Alychnenbestimmung herrschte, lag demnach zwischen 0,47 und 3,26 Trol.

b) Kalibrierung des DFM

Die Kalibrierung des DFM, ausgestattet mit dem 10°-Okular, erfolgte mit Hilfe dreier Farbarten und einer Farbvalenz. Diese Farbvalenz war duch die Strahlung der Lampe in Verbindung mit dem Absorptionsfilter VG 12 der Dicke 2 mm gegeben. Folgende Beziehung ergab sich zwischen den instrumentellen Primärvalenzen und den Bezugsvalenzen des 10°-Normvalenzsystems aus den Tabellen der Normspektralwerte $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ (18 a):

(33) $\vec{B}_{10}\ (460) = k \cdot 0{,}3023\ \vec{X}_{10} + k \cdot 0{,}1282\ \vec{Y}_{10} + k \cdot 1{,}7454\ \vec{Z}_{10}$

$\vec{G}_{10}\ (531) = 1 \cdot 0{,}2496\ \vec{X}_{10} + 1 \cdot 0{,}8854\ \vec{Y}_{10} + 1 \cdot 0{,}0280\ \vec{Z}_{10}$

$\vec{R}_{10}\ (650) = m \cdot 0{,}2683\ \vec{X}_{10} + m \cdot 0{,}1076\ \vec{Y}_{10} + m \cdot 0{,}0000\ \vec{Z}_{10}$

Dabei sind die Koeffizienten dieses Gleichungssystems den genannten Tabellen bei den Wellenlängen 460 nm, 531 nm und 650 nm entnommen. Durch das Gleichungssystem (33) sind die instrumentellen Primärvalenzen aus der Sicht der Normvalenzen festgelegt. Damit liegen die Primärvalenzen $\vec{B}_{10}$, $\vec{G}_{10}$ und $\vec{R}_{10}$ bis auf konstante Faktoren k, l und m ihrer Farbart nach also fest. Die Transformation zwischen den Farbwerten beider Systeme lautet nach Abschnitt B.1.:

(34) $X_{10} = k \cdot 0{,}3023\ B_{10} + 1 \cdot 0{,}2496\ G_{10} + m \cdot 0{,}2683\ R_{10}$

$Y_{10} = k \cdot 0{,}1282\ B_{10} + 1 \cdot 0{,}8854\ G_{10} + m \cdot 0{,}1076\ R_{10}$

$Z_{10} = k \cdot 1{,}7454\ B_{10} + 1 \cdot 0{,}0280\ G_{10} + m \cdot 0{,}0000\ R_{10}$

Dem aufmerksamen Leser dürfte nicht entgangen sein, daß ich bei der Kalibrierung des DFM von der Problematik des nicht linearen "Großfeldfarbenraumes" abgesehen habe und stattdessen den 10°-Farbenraum als dreidimensionalen Vektorraum auffasse, in dem Transformationen selbstverständlich sind. Diese Vereinfachung ist leider unumgänglich, da bislang kein speziell für den mesopischen Leuchtdichtebereich 10°-Normvalenzsystem zur Verfügung steht. Die Transformation der Farbwerte und Primärvalenzen hat daher den Anschein leuchtdichteunabhängig zu sein, was leider nicht der Fall ist. In der speziellen Großfeldnormierung (s. D. 14.) stellt sich die Normierungsvalenz VG 12 folgendermaßen dar:

(35) $\vec{C}_{VG12} = 2{,}6\ \vec{B}_{10} + 23{,}0\ \vec{G}_{10} + 0{,}78\ \vec{R}_{10}$ (H=100)

Dieser Farbvalenz soll nun die zugehörige Normfarbvalenz bezogen auf die benutzte Strahlungsverteilung der Lampe des DFM von 3000 Kelvin zugeordnet werden (149). Die Berechnung der Normfarbwerte für VG12 (bis auf einen konstanten Faktor c) leitet sich aus folgenden Gleichungen her (84):

(36) $X'_{10} = c\ X_{10} = \int \tau_\lambda P_\lambda\ \bar{x}_{10}(\lambda)\ d\lambda = 16\,550{,}9816$

$Y'_{10} = c\ Y_{10} = \int \tau_\lambda P_\lambda\ \bar{y}_{10}(\lambda)\ d\lambda = 26\,682{,}9481$

$Z'_{10} = c\ Z_{10} = \int \tau_\lambda P_\lambda\ \bar{z}_{10}(\lambda)\ d\lambda = 17\,961{,}4219$

(τ_λ = spektraler Transmissionsgrad des Filters VG12, P_λ = relative Strahlungsverteilung der Lampe im DFM).

Trotz des analogen Aufbaus von Großfeld- und Kleinfeldnormvalenz-

system besteht in einem Punkt ein beachtenswerter Unterschied. Im 2°-System nimmt der Leuchtdichtebeiwert des X- und Z- Farbwertes jeweils den Wert Null an, der Leuchtdichtebeiwert der Y-Komponente den Wert eins, so daß der Hellbezugswert einer Körperfarbe dem Normfarbwert Y zahlengleich und $V(\lambda) = \bar{y}(\lambda)$ ist (84). Diese Beziehung gilt nicht im 10°-Normvalenzsystem. Mäder (62) bestimmte experimentell die Leuchtdichtebeiwerte ξ, η und ζ des 10°-Normvalenzsystems und erhielt die Werte:
$\xi_{10} = 0{,}015$, $\eta_{10} = 0{,}964$ und $\zeta_{10} = 0{,}021$.

Es lautet also die spezielle Abneysche Gleichung:

(37) $V_{10}(\lambda) = 0{,}015\ \bar{x}_{10}(\lambda) + 0{,}964\ \bar{y}_{10}(\lambda) + 0{,}021\ \bar{z}_{10}(\lambda)$

Auch Kanzow (36) stellte fest, daß seine experimentell gefundene $V_{10}(\lambda)$ - Kurve nicht besonders gut mit der von der CIE 1964 empfohlenen $\bar{y}_{10}(\lambda)$ - Spektralwertkurve übereinstimmte. Dennoch wurde für die Kalibrierung des DFM eine Gleichsetzung des Y_{10}-Farbwertes des Absorptionsfilters VG12 mit der gemessenen Leuchtdichte 2,48 cd/m² dieser Farbvalenz gewagt, um zumindest eine Vorstellung spezieller farbmetrischer Begriffe wie Fehlfarbe und Alychne auch im 10°-Normvalenzsystem zu bekommen. Aus dem Gleichungssystem (36) ergibt sich somit für das Filter VG12:

$$X_{10} = 1{,}54$$

$$Y_{10} = 2{,}48 \text{ cd/m}^2$$

$$Z_{10} = 1{,}67$$

VG12 (H=100) stellt sich im Normvalenzsystem wie folgt dar:

(38) $\vec{C}\,(\text{VG12}) = 1{,}54\ \vec{X}_{10} + 2{,}48\ \vec{Y}_{10} + 1{,}67\ \vec{Z}_{10}$

Durch Einsetzen der Farbwerte aus Gl. (35) und (38) in das Gleichungssystem (34) entsteht das Gleichungssystem (39):

(39) $1{,}54 = k \cdot 0{,}3023 \cdot 2{,}6 + 1 \cdot 0{,}2496 \cdot 23{,}0 + m \cdot 0{,}2683 \cdot 0{,}78$

$2{,}48 = k \cdot 0{,}1282 \cdot 2{,}6 + 1 \cdot 0{,}8854 \cdot 23{,}0 + m \cdot 0{,}1076 \cdot 0{,}78$

$1{,}67 = k \cdot 1{,}7454 \cdot 2{,}6 + 1 \cdot 0{,}0280 \cdot 23{,}0 + m \cdot 0{,}0000 \cdot 0{,}78$

Die Auflösung dieses Gleichungssystems (39) führt zu folgenden Ergebnissen:

$$k = 0{,}359$$
$$l = 0{,}1026$$
$$m = 3{,}211$$

Setzt man diese Werte in Gl. (34) ein, erhält man die gesuchte Transformationsmatrix, die den Übergang vom B_{10}, G_{10}, R_{10} - ins CIE-Normvalenzsystem 1964 leistet.

$$(40)\quad \begin{pmatrix} X_{10} \\ Y_{10} \\ Z_{10} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0{,}1085 & 0{,}0256 & 0{,}8616 \\ 0{,}0460 & 0{,}0909 & 0{,}3455 \\ 0{,}6266 & 0{,}0029 & 0{,}0000 \end{pmatrix}}_{= D} \begin{pmatrix} B_{10} \\ G_{10} \\ R_{10} \end{pmatrix}$$

Aus D berechnet sich D^{-1} zu

$$(41)\quad D^{-1} = \begin{pmatrix} 0{,}0231 & -0{,}0590 & 1{,}5964 \\ -4{,}9780 & 12{,}4142 & -0{,}0492 \\ 1{,}3056 & -0{,}3615 & -0{,}1996 \end{pmatrix}$$

Ebenso wie die Primärvalenzen, so transformieren sich auch die Leuchtdichtebeiwerte mit der zu D kontragredienten Matrix $\left|D^{T}\right|^{-1}$ (s. B.1., (94)).

E. Versuchsdurchführung

E.16. Fehlfarben

Grundsätzlich sollte vorweggenommen werden, daß die Einstellung eines Abgleiches am DFM bei mesopischer Kleinfeldbetrachtungsweise der einzelnen Versuchsperson mehr Konzentration abverlangte, als dies bei gleichem Leuchtdichteniveau die Großfeldbeobachtung tat, und daß der Farbabgleich bei Großfeldbetrachtungsweise auf diesem Helligkeitsniveau in der Regel genauer war, dafür aber auch zeitraubender.
Für beide Versuchspersonen wurden je zehn Verwechslungsgeraden - sogenannte isochromatische Linien - bei Großfeld -(10°) und, nach Einschieben einer Gesichtsfeldblende, Kleinfeldbetrachtung (2°) aufgestellt. Jeder Verwechslungsgeraden lag ein mesopischer Ausgangsfarbreiz zugrunde, der zunächst von einem normalen Trichromaten nachgemischt wurde (in Abb. 6 - 12 wird der Ausgangsreiz jeweils durch einen offenen Kreis symbolisiert). Die physikalische Erzeugung der Ausgangsfarbreize beider Beobachtungsbedingungen war dieselbe. Die Farbreize, die der rechten Gesichtsfeldhälfte des DFM angeboten wurden, kamen durch Überlagerung der Strahlengänge des Interferenzverlaufsfilters IF (Abb. 5) und des Farbfilters BG 3/1, 2 mm, zustande. Die Farbarten aller Ausgangsvalenzen lagen zufällig auf einer nahezu parabelförmigen Kurve in der B, G, R-Farbtafel. Zunächst wurden die Ausgangsreize von einem normalen Trichromaten, dem Verfasser, abgeglichen. Bis auf geringe Korrekturen erkannten beide Deuteranopen diesen Farbabgleich an. Ein Farbabgleich sollte grundsätzlich innerhalb von drei Sekunden nach Neutralstimmung des beobachtenden Auges als solcher anerkannt werden.
Die Farbwerte dieser Abgleiche gingen als Minuend in die Auswertung ein. Nun wurde der Abgleich durch Verändern des "grünen" Farbwertes in der linken Photometerhälfte zerstört und der Deuteranop aufgefordert, zunächst nur durch Variation der roten Primärvalenz einen neuen Farbabgleich anzustreben. Auf kleinem Gesichtsfeld (2°) gelang dies beiden Versuchspersonen auf Anhieb. Bei Großfeldbeobachtung benötigten beide neben der Rotänderung eine Veränderung des "blauen" Farbwertes, um vollständige Farbgleichheit herzustellen.
Die so entstandenen Repräsentanten (B_i, G_i, R_i) i=1,...,n einer dichromatischen Farbvalenz im trichromatischen Farbenraum wurden von der Ausgangsfarbvalenz (B_o, G_o, R_o) gemäß einer Vektor-

subtraktion abgezogen. Den Differenzvektoren
($B_o - B_i$; $G_o - G_i$; $R_o - R_i$) i=1,....,n, die ja als Fehlfarbenrichtungsvektoren bezeichnet werden (s. B.5.), wurde ein mittlerer Fehlfarbenrichtungsvektor zugewiesen. Da bislang kein projektiv invariantes Mittelungsverfahren zur Verfügung steht, der projektive Charakter der Fehlfarben jedoch als eine wesentliche Eigenschaft der Fehlfarben verstanden werden muß, schlage ich vor, ein einfaches Mittelungsverfahren an einen bestimmten festgelegten Farbenraum (z. B. den B, G, R-Farbenraum) zu binden und nur in diesem Raum Mittelungen durchzuführen. Ergebnisse, die in anderen Räumen zustande kämen, müßten dann zunächst in dieses System transformiert werden und dort einer Mittelwertbildung zugeführt werden. Der in diesem System gewonnene Mittelwert kann dann in den ursprünglichen Raum transformiert werden. Nach folgendem Prinzip habe ich eine Mittelung der Fehlfarbenrichtungsvektoren vorgenommen: Zunächst wurde der Median (41) der roten und grünen Farbwertanteile der Fehlfarbenrichtungsvektoren in der B, G, R-Farbtafel bestimmt. Bei einer ungeraden Anzahl von Fehlfarbenrichtungsvektoren lauteten die Koordinaten des mittleren Fehlpunktes (der die mittlere Fehlfarbe projektiv beschreibt) in der B, G, R-Farbtafel:
(med g_i; med r_i) (i=1,....,n). War die Anzahl der Fehlfarbenrichtungsvektoren gerade, so schloß ich einen Beliebigen aus und wandte obiges Verfahren zur Bestimmung eines mittleren Fehlfarbenrichtungsvektors für die verbleibende ungerade Anzahl von Richtungsvektoren an. So wurde jeder isochromatischen Linie bei ungerader Anzahl von Richtungsvektoren ein mittlerer Fehlfarbenrichtungsvektor zugeordnet, bei gerader Anzahl wurden einer Verwechslungsgeraden sowohl der von der Mittelung ausgeschlossene Richtungsvektor als auch der durch Mittelung gebildete Fehlfarbenrichtungsvektor als "mittlere" Fehlfarbenrichtungsvektoren zugeordnet. In den Abbildungen 6 - 11 ist die Nummer des Fehlpunktes, der von der Mittelung ausgeschlossen worden ist, mit einem Strich versehen. Nach dem gleichen Verfahren wies ich den mittleren Fehlfarbenrichtungsvektoren der Verwechslungsgeraden nun einen allgemeinen mittleren Fehlfarbenrichtungsvektor (bzw. mittlere Fehlfarbe) zu. Eine gerade Anzahl von mittleren Fehlfarbenrichtungsvektoren gebot mir, denjenigen, der am ehesten aus der Reihe herausfiel, zu eliminieren und der ungeraden Anzahl nach obiger Weise einen mittleren Fehlfarbenrichtungsvektor zuzuordnen.

E.17. Alychnenbestimmung bei Großfeldbeobachtung (10°)

In Anlehnung an entsprechende Ausführungen in Abschnitt B.7. handelt es sich präzise ausgedrückt um die Bestimmung einer "Intervall-Alychne", d. h. einer Alychne, die nur den Isolychnen eines gewissen beschränkten Leuchtdichtebereichs parallel ist. Als zweidimensionaler linearer Unterraum wird die Alychne durch zwei nicht parallele Vektoren, z. B. durch einen Fehlfarbenrichtungsvektor und einen Quervektor aufgespannt. Die Alychnenbestimmung geht auf eine Isolychnenbestimmung zurück (102). Diese wiederum beruht auf heterochromen Helligkeitsabgleichen, bei denen die beiden Photometerhälften auch für den Deuteranopen verschiedenfarbig sind. Das Vorgehen im einzelnen gestaltete sich folgendermaßen: Gegeben war eine mesopische Farbvalenz $\vec{a}_1$ mit den Farbwerten (B_1, G_1, R_1) auf der linken Photometerhälfte. Die Farbe der rechten Photometerhälfte unterschied sich auch für den Deuteranopen deutlich von der der linken Hälfte. Die Probanden hatten nun die Aufgabe, beide Gesichtsfeldhälften bezüglich der Helligkeit abzugleichen, und zwar nach dem Kriterium der "minimalen Schärfe der Trennungslinie beider Photometerhälften" (minimally distinct borderline) (129). Die eingestellte Helligkeit am Brodhun-Sektor wurde notiert.

Dann mischte die Versuchsperson die Farbvalenz $\vec{a}_3$ der rechten Gesichtsfeldhälfte im linken Photometerfeld nach, bis vollständige Farbgleichheit herrschte. Die neuen Farbwerte B_2, G_2, R_2 und die Helligkeit am Brodhun-Sektor wurden wiederum notiert. Es kam also folgende Beziehung zustande (s. dazu auch Abb. 3):

$$\vec{a}_1 = B_1 \vec{B} + G_1 \vec{G} + R_1 \vec{R} \overset{\text{heterchr.}}{=} B_2 \vec{B} + G_2 \vec{G} + R_2 \vec{R} =: \vec{a}_3$$

Für die heterochromen wie für die isochromen Helligkeitsabgleiche wurden die Messungen sechsmal durchgeführt und anschließend das arithmetische Mittel gebildet. Die Differenz der Vektoren $\vec{a}_1$ und $\vec{a}_3$ ergab den Quervektor $\vec{q}$. Die Mittelung der Quervektoren erfolgte nach dem gleichen Verfahren, das bereits bei der Mittelung der Fehlfarbenrichtungsvektoren im vorigen Abschnitt beschrieben wurde.

E.18. Der Konvergenz-Abgleich

In einem Vorversuch wurden die Intensitäten zehn verschiedener Farbreize derart festgelegt, daß bei einer Leuchtdichteabschwächung des Mischungs-und Probenstrahlenganges um den Faktor 360 die Zapfenschwelle gerade unterschritten wurde, also keine Buntheit mehr - ausgenommen ein schwaches Rot - zu sehen war. Die Leuchtdichte der Reize, die konvergierend abgeglichen werden sollten, lag um das Vierfache über der Helligkeit derjenigen Ausgangsreize, die der Fehlfarbenbestimmung zugrunde lag, (war aber von gleicher Farbart), um den Sprung vom Experimentierniveau in den skotopischen Bereich möglichst tief geraten zu lassen. Die Versuche fanden in einem vollkommen verdunkeltem Raum statt. Auf Experimentierniveau (1,9 Trol bis 13,0 Trol) war die stationäre Raumbeleuchtung mittels Leuchtstofflampen schwach genug, um die Stäbchenerregung möglichst klein zu halten. Der Versuchsablauf gestaltete sich nun folgendermaßen: Zunächst wurde der Farbreiz (1,9 Trol bis 13,0 Trol) von einem normalen Trichromaten bei Zimmerbeleuchtung abgeglichen und in der Regel auch vom Deuteranopen anerkannt. Dann wurde durch Einbringen von nichtselektiven Sieben in den Probenstrahlengang und Betätigung des Brodhun-Sektors, im Mischungsstrahlengang durch Einschieben von nichtselektiven Sieben und eines Graufilters die Leuchtdichte in beiden Photometerfeldern jeweils um den Faktor 360 reduziert. Nach etwa fünf Minuten Dunkeladaptation im vollkommen abgedunkelten Raum hatte die Versuchsperson die Aufgabe, nun einen reinen Helligkeitsabgleich vorzunehmen, und zwar allein mit der grünen Primärvalenz. Nach Entfernung der Schwächungsmedien und Einstellung des Brodhun-Sektors auf den ursprünglichen mesopischen Wert hatte der Deuteranop bei Raumbeleuchtung erneut einen dichromatischen Farbabgleich herzustellen, d. h. jetzt nur unter Benutzung der blauen und der roten Primärvalenz bei konstant gehaltenem Grünwert G usw. Diese iterierende Abgleichsmethode konvergierte schließlich gegen einen Abgleich, der sowohl im Skotopischen als auch im Photopischen Gültigkeit hatte, den Konvergenz-Abgleich (B.10.).

Um die Hypothese, einer dichromatischen Valenz, d. h. einer dichromatischen Klasse trichromatischer Farbvalenzen, entspreche genau ein Konvergenz-Abgleich, zu widerlegen, wurden jeweils zwei trichromatischen Farbvalenzen als Repräsentanten der dichromatischen Farbvalenz die zugehörigen Konvergenzabgleiche zugewiesen. Ferner

wurde am Beispiel eines beliebigen Farbreizes die Unabhängigkeit des Konvergenz-Abgleichs von den Anfangsbedingungen demonstriert. Zunächst wurde dem Deuteranopen aufgetragen, vom Abgleich dieses Farbreizes durch einen normalen Trichromaten einen Konvergenz-Abgleich zu starten; danach sollte er von einer anderen extremen Anfangsbedingung (G=0) aus einen Konvergenz-Abgleich derselben Farbvalenz durchführen.

F. Ergebnisse

F.19. Fehlfarben bei Klein-und Großfeldbeobachtung im modifizierten WDW-System

Beiden Versuchspersonen wurden zehn Ausgansreize unter Klein- und Großfeldbedingung vorgegeben, denen sie jeweils zwischen zwei und sieben dichromatisch identische, trichmatisch verschiedene Farbvalenzen zuordneten. Für jede isochromatische Linie wurde ein Fehlpunkt als Farbart eines mittleren Fehlfarbenrichtungsvektors dieser isochromatischen Linie bestimmt. Die Abbildungen 6 bis 9 zeigen die Darstellung der Verwechslungsgeraden, deren Fehlpunkte und den mittleren Fehlpunkt in der Farbtafel des WDW-Systems für das kleine und große Gesichtsfeld. Die offenen Kreise markieren die Ausgangsreize. Die Verwechslungsgeraden sind von Blau nach Gelb fortlaufend numeriert.

F.20. Darstellung der Großfeldergebnisse im CIE-System (1964)

Über Verlauf und Lage deuteranopischer Verwechslungsgeraden und Fehlpunkte im CIE-System (1931), die bei Kleinfeldbetrachtung auf photopischem Niveau gewonnen wurden, informiere sich der Leser z. B. bei Kröger-Paulus (49) oder Scheibner (100). Auf den Abbildungen 10 u. 11 sind die Ergebnisse für die Großfeldbetrachtungsweise im CIE-System (1964) dargestellt. Die den Übergang in dieses System leistende Transformationsmatrix findet man in Abschnitt D.15.b. Tabelle 1 zeigt die Farbwerte B_F, G_F und R_F des auf $G_F = 1$ normierten mittleren Fehlfarbenrichtungsvektors im feldgrößenabhängig modifizierten B, G, R-System (D.14.) beider Versuchspersonen bei Groß- und Kleinfeldbetrachtung:

Tab. 1

Vp.	R_F	G_F	R_F	Gesichts-feldgröße	Normierung
W.P.	0,0	1	-0,266	2°	N1 (0,4)
O.M.	0,0	1	-0,316	2°	N1 (0,4)
W.P.	-0,238	1	-0,165	10°	N2 (0,2)
O.M.	-0,127	1	-0,208	10°	N2 (0,2)

Tabelle 2 gibt die Farbwertanteile des mittleren Fehlpunktes in der Farbtafel des modifizierten WDW-Systems in der der Betrachtungsweise zugehörigen Normierung an:

Tab. 2

Vp.	g_F	r_F	Gesichts-feldgröße	Normierung
W.P.	1,3624	-0,3624	2°	N1 (0,4)
O.M.	1,4620	-0,4620	2°	N1 (0,4)
W.P.	1,1534	-0,1534	2°	N2 (0,2)
O.M.	1,1876	-0,1876	2°	N2 (0,2)
W.P.	1,6750	-0,2764	10°	N2 (0,2)
O.M.	1,5037	-0,3129	10°	N2 (0,2)

In der Tabelle 3 sind die Farbwertanteile des mittleren Fehlpunktes in der CIE-Farbtafel für die Großfeldbeobachtung aufgelistet.

Tab. 3

Vp.	x_F	y_F	Gesichts-feldgröße	Normierung
O.M.	0,7250	-0,0571	10°	N2 (0,2)
W.P.	0,5359	-0,0864	10°	N2 (0,2)

Tabelle 4 gibt Farbwerte und Farbwertanteile der normierten mittleren Fehlfarbenrichtungsvektoren beider Versuchspersonen auf großem Gesichtsfeld in der ursprünglichen Wrightschen 1 : 1 Normierung wieder.

Tab. 4

Vp.	B_F	G_F	R_F	Gesichts-feldgröße	Normierung
O.M.	-0,635	1	-1,04	10°	1 : 1
W.P.	-1,190	1	-0,825	10°	1 : 1
	g_F	r_F			
W.P.	-0,9852	0,8128		10°	1 : 1
O.M.	-1,4815	1,5407		10°	1 : 1

F.21. Großfeld-Verwechslungsgeraden bei Kleinfeldnormierung

Wendet man die auf kleinem Feld (2°) gewonnenen Verhältnisse E/D (494) und E/F (583) auf die Farbwerte D_{10}, E_{10}, F_{10} der Geräteprimärvalenzen von Großfeldabgleichen an und nimmt anschließend eine Gewichtung dieser Farbwerte gemäß N1 (s. D.14.) vor, derart, daß $B = E/D\ (494) \cdot D_{10}$, $G = E_{10}$ und $R = E/F\ (583) \cdot F_{10} \cdot 0{,}4$ gilt, so erhält man die in Abbildung 12 demonstrierten Ergebnisse. Dieses Vorgehen erscheint mir insofern zweckmäßig, als hierdurch die äußeren Voraussetzungen einer Vergleichbarkeit bezüglich des Verlaufs der Verwechslungsgeraden und der Fehlpunkte beider Beobachtungsbedingungen geschaffen werden. Ähnliche Ergebnisse erzielt man auch für die Versuchsperson O.M. (nicht abgebildet).

(g,r)-Farbtafel nach WRIGHT

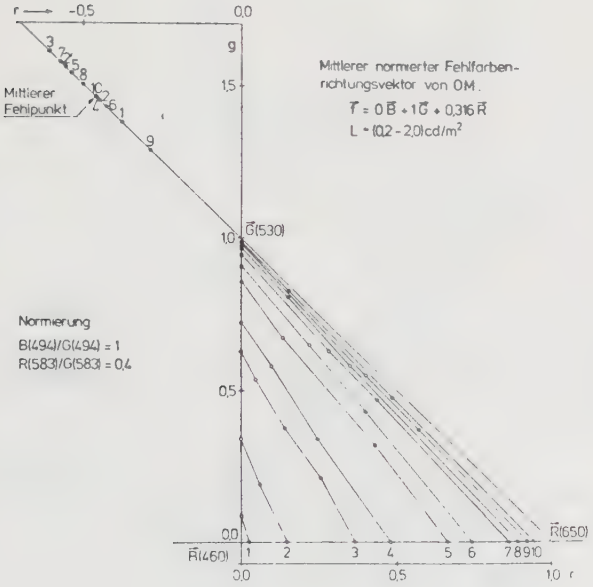


Abb. 6: Ergebnisse der Fehlfarbenbestimmung bei mesopischer Kleinfeldbetrachtungsweise (2°) für die Versuchsperson O.M.

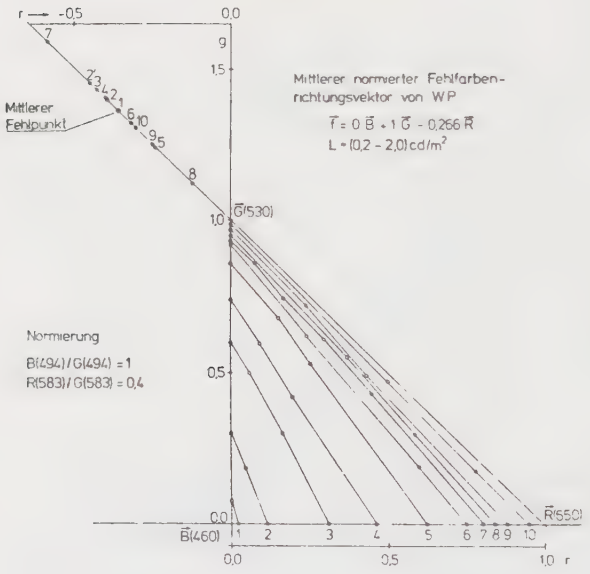


Abb. 7: Ergebnisse der Fehlfarbenbestimmung bei mesopischer Kleinfeldbetrachtungsweise (2°) für die Versuchsperson W.P.

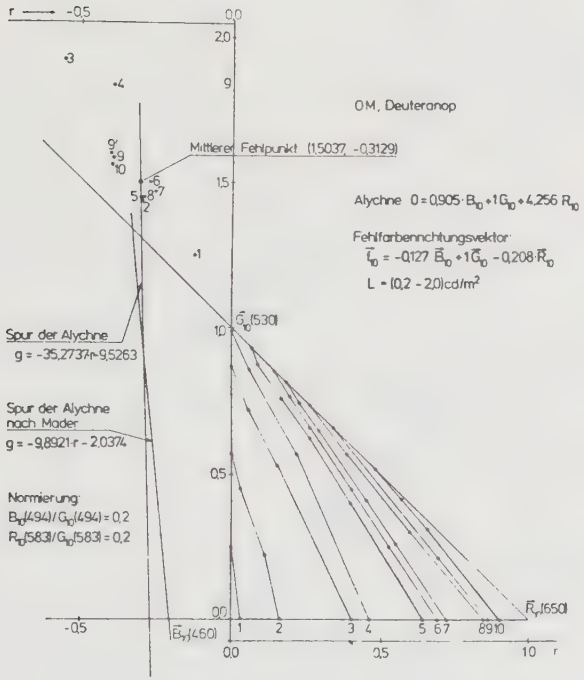


Abb. 8: Ergebnisse der Fehlfarben- und Alychnenbestimmung der Versuchsperson O.M. bei mesopischer Großfeldbetrachtungsweise (10°). Zum Vergleich wurde die von Mäder (62) ermittelte trichromatische photopische Alychne gemäß Abschnitt B.1. in das modifizierte B, G, R-System transformiert und deren Spur eingezeichnet.

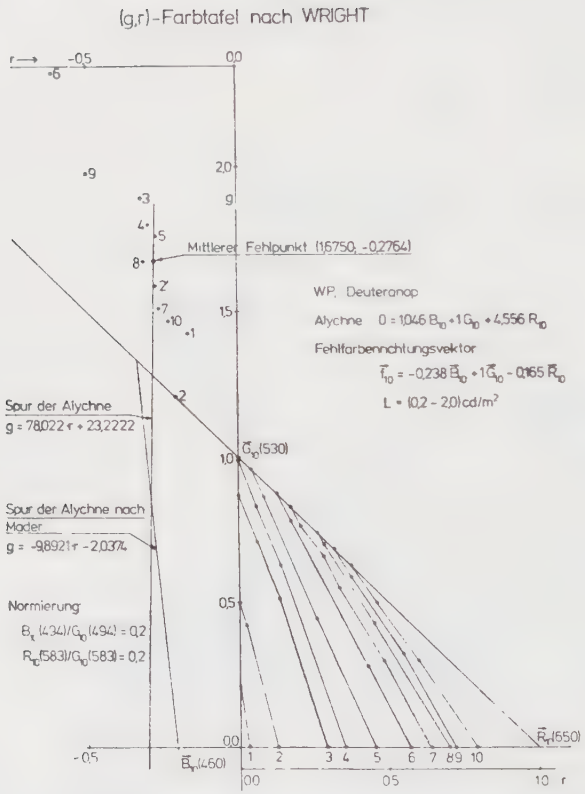


Abb. 9: Ergebnisse der Fehlfarben- und Alychnenbestimmung der Versuchsperson W.P. bei mesopischer Großfeldbetrachtungsweise (10°). Weitere Erläuterungen in Abb. 8.

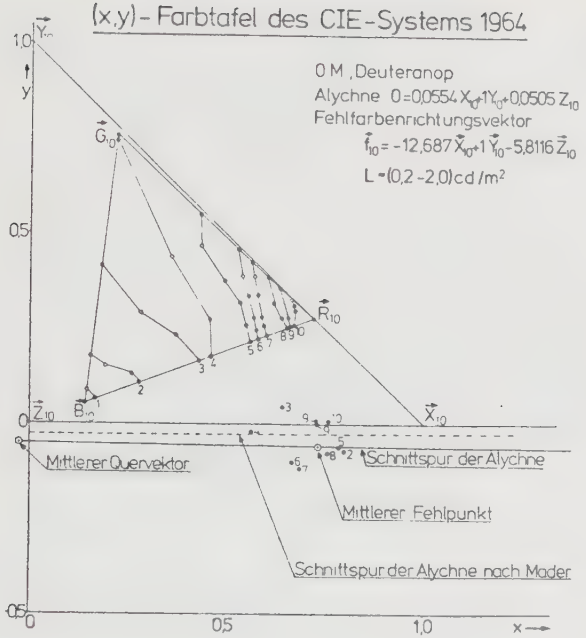


Abb. 10: Verwechslungsgeraden, Fehlpunkte und Spur der Alychne der deuteranopischen Versuchsperson O.M. im System des Farbmetrischen Großfeldnormalbeobachters CIE 1964. Zum Vergleich wurde wiederum die Schnittspur der von Mäder (62) ermittelten trichromatischen photopischen Alychne eingezeichnet.

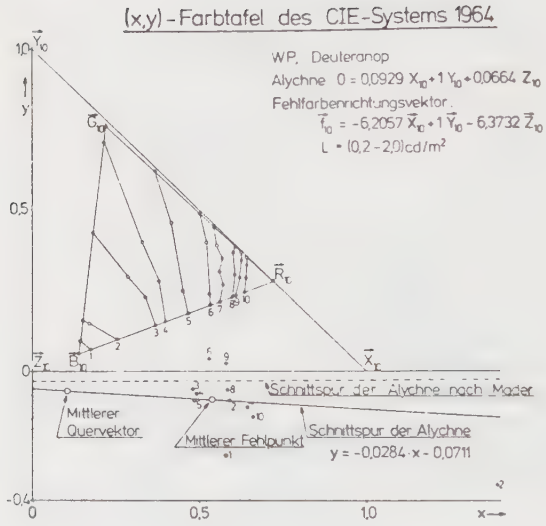


Abb. 11: Verwechslungsgeraden, Fehlpunkte und Spur der Alychne der deuteranopischen Versuchsperson W.P. im System des Farbmetrischen Großfeldnormalbeobachters CIE 1964. Weitere Erläuterungen in Abb. 10.

F.22. Reduktion der Großfeld-Trichromasie auf eine Großfeld-Deuteranopie

Das Ergebnis einer intervallweisen Reduktion einer Großfeld-Deuteranopie aus der Großfeld-Trichromasie sind leuchtdichteabhängige dichromatische Spektralwertkurven $\bar{k}_{10m}(\lambda)$ und $\bar{w}_{10m}(\lambda)$. Der Index m soll auf den für die Spektralwertkurven $\bar{k}_{10}(\lambda)$ und $\bar{w}_{10}(\lambda)$ gültigen Leuchtdichtebereich hinweisen, in unserem Fall auf den mesopischen Leuchtdichtebereich. Der Index 10 soll daran erinnern, daß die Reduktion auf eine Fehlfarbe zurückgeht, die bei Großfeldbetrachtung (10°) gewonnen wurde. Da mir keine mesopischen (10°)-Spektralwertkurven zur Verfügung standen, basieren meine Reduktionen auf mesopische Spektralwerte extrafovealer Reizaufnahme 2° im Durchmesser 3° 20' peripher der Fovea centralis (82). Die Reduktion wurde jeweils zunächst für die Farbwerte durchgeführt (s. Gl.(9), Tab. 1) und dann auf die mesopischen Spektralwerte angewandt. Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der Reduktion für die beiden deuteranopischen Versuchspersonen unter Berücksichtigung der speziellen Großfeldnormierung aus Abschnitt D.14. (N2).

Tab. 5

W.P.	$\bar{b}_m^* + 0{,}238\ \bar{g}_m^*$	$= \bar{k}_{10m}^*$	(λ)
	$0{,}165\ \bar{g}_m^* + \bar{r}_m^*$	$= \bar{w}_{10m}^*$	(λ)
O.M.	$\bar{b}_m^* + 0{,}127\ \bar{g}_m^*$	$= \bar{k}_{10m}^*$	(λ)
	$0{,}208\ \bar{g}_m^* + \bar{r}_m^*$	$= \bar{w}_{10m}^*$	(λ)

Die wichtigere Tabelle 6 führt uns die Reduktionsergebnisse beider Versuchspersonen in der Wrightschen 1 : 1 Normierung (s. Tab.4) vor Augen:

Tab. 6

W.P.	$\bar{k}_{10}^{B}(\lambda)$	=	$\bar{b}_m$	+ 1,190	$\bar{g}_m$
	$\bar{w}_{10}^{B}(\lambda)$	=		0,825 $\bar{g}_m$	+ $\bar{r}_m$
O.M.	$\bar{k}_{10}^{B}(\lambda)$	=	$\bar{b}_m$	+ 0,635	$\bar{g}_m$
	$\bar{w}_{10}^{B}(\lambda)$	=		1,040 $\bar{g}_m$	+ $\bar{r}_m$

Auf den Abbildungen 13 u. 14 ist die Reduktion der drei mesopischen trichromatischen Spektralwertkurven extrafovealer Herkunft $\bar{b}_m(\lambda)$, $\bar{g}_m(\lambda)$ und $\bar{r}_m(\lambda)$ (82) auf zwei mesopische deuteranopische Spektralwertkurven $\bar{k}_{10}^{B}(\lambda)$ und $\bar{w}_{10}^{B}(\lambda)$ graphisch dargestellt. Die mesopischen trichromatischen Spektralwertkurven gehen auf Daten von Richards und Luria (82) zurück, die im Jahre 1964 für drei verschiedene mesopische Leuchtdichteniveaus "bright", "dim" und "dark" Spektralwertkurven peripherer Netzhautareale bezogen auf die Primärvalenzen $\vec{A}$ (459,3 nm), $\vec{H}$ (526,3 nm) und $\vec{C}$ (645,2 nm) aufstellten. Mit gewissen Vorbehalten erscheint mir die "Verquickung" unterschiedlicher geometrischer Netzhautreizung (einerseits 3° 20' peripher, andererseits 10° central fixiert) bei der Reduktion der Dichromasie bzw. Monochromasie aus der Trichromasie zu Gunsten von Ergebnissen, die immerhin dem mesopischen Leuchtdichtebereich Rechnung tragen, gerechtfertigt, imponiert doch der zentrale Anteil des Großfeldes als "Maxwell-Fleck" (131), den ich meinen Versuchspersonen zu ignorieren auftrug. Um Richards' und Lurias (82) Spektralwertkurven $\bar{a}$, $\bar{h}$, $\bar{c}$ in das Wrightsche B, G, R-System zu transformieren, wurden die von Richards und Luria benutzten Wellenlängen der Primärvalenzen am Interferenzverlaufsfilter eingestellt und mit dem DFM nachgemischt. Dabei konnten zwischen der Farbart der blauen Primärvalenzen $\vec{A}$ und $\vec{B}$ einerseits und der roten Primärvalenzen $\vec{C}$ und $\vec{R}$ andererseits visuell keine Unterschiede festgestellt werden.

Es ergaben sich folgende Beziehungen zwischen den Primärvalenzen nach Richards und Luria und den Geräteprimärvalenzen:

$$\vec{A} = 1\,\vec{D} + 0\,\vec{E} + 0\,\vec{F}$$
$$\vec{H} = 2\,\vec{D} + 49\vec{E} + 0\,\vec{F}$$
$$\vec{C} = 0\,\vec{D} + 0\,\vec{E} + 1\,\vec{F}$$

Nach Abschnitt B.1. transformieren sich die Farbwerte wie folgt:

$$(42)\quad \begin{pmatrix} D \\ E \\ F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0 & 49 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ H \\ C \end{pmatrix}$$

A, H, C sind die zu den Primärvalenzen $\vec{A}$, $\vec{H}$, $\vec{C}$ gehörigen Farbwerte.

Zur Darstellung der Spektralwertkurven in der Wrightschen 1 : 1 Normierung wurden die Funtkionswerte der grünen ($\bar{e}$) und roten ($\bar{f}$) Spektralwertkurve bei 583 nm, ebenso die Funktionswerte der nun feststehenden grünen ($\bar{g}$) und blauen ($\bar{d}$) Spektralwertkurve bei 494 nm gleichgesetzt. Dies hatte zur Folge, daß die grüne Kurve um den Faktor 5,2, die blaue Kurve um den Faktor 12,72 gestreckt werden mußte.

In den Abbildungen 13 u. 14 liegt das Maximum der $\bar{w}_{10}(\lambda)$ - Kurve für W.P. wie für O.M. bei 556 nm. Das absolute Maximum der $\bar{k}_{10}(\lambda)$ - Kurve beider Probanden ist bei 465 nm zu suchen und stimmt mit dem Maximum der blauen Spektralwertkurve $\bar{b}_m(\lambda)$ überein. Außerdem zeigt die $\bar{k}_{10}(\lambda)$ - Kurve beider Versuchspersonen ein ausgeprägtes Nebenmaximum bei 526 nm.

F.23. Großfeldalychnen und Reduktion auf eine Quasimonochromasie

Für die Alychnenbestimmung bei Großfeldbetrachtungsweise (10°) auf mesopischem Leuchtdichteniveau ist neben der Fehlfarbe die Bestimmung eines Quervektors notwendig (s. B.7.). Insgesamt wurden zehn Quervektoren bestimmt, deren zugrundeliegende Paare heterochromatischer Farbreize zwischen der blauen "Ecke" und der gelben Seite der Farbtafel lokalisiert waren. Der Farbort des mittleren Quervektors ist in den Abbildungen 10 u. 11 eingetragen. Die Gerade durch den Farbort des mittleren Quervektors und der mittleren Fehlfarbe kennzeichnet die Alychnenspur der mittleren Alychne. Aus jedem Quervektor und der diesen benachbarten Fehlfarbe wurde "lokal" eine Alychne berechnet. Diese Alychnen wurden von Blau nach Gelb fortlaufend numeriert. Die ihnen zugeordneten Leuchtdichtebeiwerte β, γ und ρ sind in den Abbildungen 17 u. 18 graphisch aufgetragen.

Tabelle 7 zeigt für die beiden Versuchspersonen die Farbwerte der gemittelten und auf $G_Q = 1$ normierten Quervektoren in der speziellen Großfeldnormierung (D.14.) N2.

Isochromatische Linien in der (g,r)-Farbtafel nach Wright

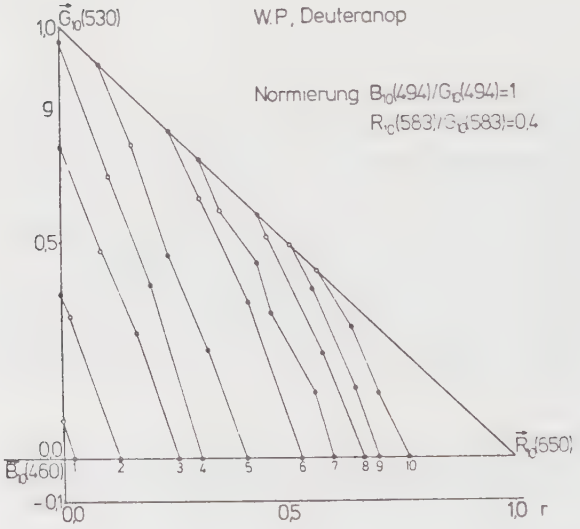


Abb. 12: Isochromatische Linien der Versuchsperson W.P. bei mesopischer Großfeldbetrachtungsweise (10°). Die Normierungsfaktoren gingen aus der Rayleigh- und Trendelenburggleichung hervor, die jeweils auf kleinem Gesichtsfeld (2°) ermittelt wurden (s. F.21.):
$B_{10} = E/D(494)\cdot D_{10}$, $G_{10} = E_{10}$, $R_{10} = E/F(583)\cdot F_{10}\cdot 0,4$.

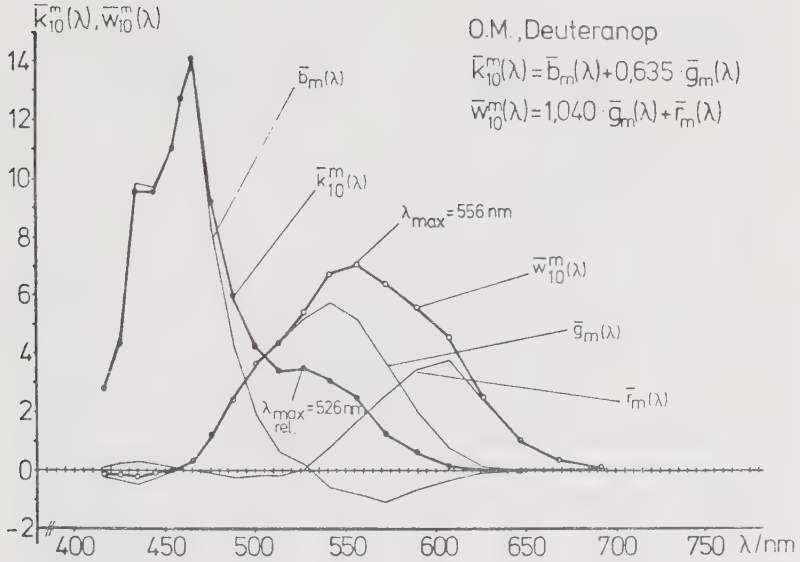


Abb. 13: Trichromtische Spektralwertkurven $\bar{b}_m(\lambda)$, $\bar{g}_m(\lambda)$, $\bar{r}_m(\lambda)$ nach Richards und Luria (82) und reduzierte dichromatische Spektralwertkurven $\bar{k}_{10m}(\lambda)$ und $\bar{w}_{10m}(\lambda)$ der Versuchsperson O.M. bei mesopischem Leuchtdichteniveau.

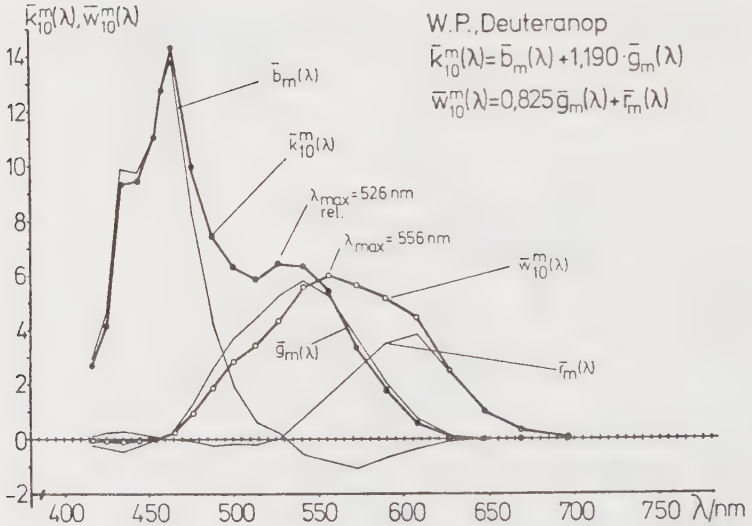


Abb. 14: Trichromatische Spektralwertkurven $\bar{b}_m(\lambda)$, $\bar{g}_m(\lambda)$, $\bar{r}_m(\lambda)$ nach Richards und Luria (82) und reduzierte dichromatische Spektralwertkurven $\bar{k}_{10m}(\lambda)$ und $\bar{w}_{10m}(\lambda)$ der Versuchsperson W.P. bei mesopischem Leuchtdichteniveau.

Tab. 7

Vp.	B_Q	G_Q	R_Q	Normierung
O.M.	-3,170	1	0,439	N2
W.P.	-2,138	1	0,271	N2

In Tabelle 8 sind die Farbörter der mittleren Quervektoren in der Großfeld - B_{10}, G_{10}, R_{10} - Farbtafel wiedergegeben:

Tab. 8

Vp.	g_Q	r_Q	Normierung
O.M.	-0,5777	-0,2536	N2
W.P.	-1,1534	-0,3126	N2

Die Farbörter der mittleren Quervektoren liegen außerhalb des Spektralfarbenzuges. Die Farbart der Quervektoren ist virtuell. Aufgrund der von mir gewählten speziellen Großfeldnormierung N2 mußte aus zeichentechnischen Gründen auf die Darstellung der mittleren Quervektoren in den Abbildungen 8 u. 9 verzichtet werden. Tabelle 9 zeigt die Farbörter der mittleren Quervektoren beider Probanden in der CIE-Farbtafel des Großfeldnormalbeobachters von 1964 (18 a). Siehe dazu auch Abbildung 10 u. 11. Die Transformationsmatrix wurde bereits in Abschnitt D.15.b. eingeführt.

Tab. 9

Vp.	x_Q	y_Q
O.M.	-0,0328	-0,0530
W.P.	0,1022	-0,0619

Tabelle 10 gibt die mittleren Leuchtdichtebeiwerte in der Großfeldnormierung des WDW-Systems beider Versuchspersonen an, wobei der grüne Leuchtdichtebeiwert auf $\gamma'_{10} = 1$ normiert ist.

Tab. 10

Vp.	β'_{10}	γ'_{10}	ϱ'_{10}	Normierung
O.M.	0,905	1	4,256	N2
W.P.	1,045	1	4,556	N2

Die entsprechenden Leuchtdichtebeiwerte in der 1 : 1 Normierung nach Wright sind in Tabelle 11 zu finden. Siehe dazu auch Abbildung 17 u. 18.

Tab. 11

Vp.	β_{10}	γ_{10}	ϱ_{10}
O.M.	0,181	1	0,851
W.P.	0,209	1	0,911

Tabelle 12 gibt Aufschluß über die Größe der Leuchtdichtebeiwerte im CIE-System (1964), wo ξ_{10} der Leuchtdichtebeiwert der Primärvalenz $\vec{X}_{10}$, η_{10} der Leuchtdichtebeiwert der Primärvalenz $\vec{Y}_{10}$ und ζ_{10} der Leuchtdichtebeiwert der Primärvalenz $\vec{Z}_{10}$ ist. Aus der Transformation der Leuchtdichtebeiwerte folgt:

Tab. 12

Vp.	ξ_{10}	η_{10}	ζ_{10}
O.M.	0,0554	1	0,0505
W.P.	0,0929	1	0,0664

Die Abbildungen 17 u. 18 stellen die Leuchtdichtebeiwerte "lokal" bestimmter Alychnen dar. In Abbildung 15 und 16 ist das Ergebnis der Reduktion von trichromatischen mesopischen Spektralwertkurven

$\bar{b}_m$, $\bar{g}_m$ und $\bar{r}_m$ (s. F.22.) auf eine spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion $\bar{l}_m$ gezeigt. Das Maximum der Hellempfindlichkeitskurven beider Versuchspersonen liegt bei 556 nm (stark ausgezogene Kurve). Abbildung 19 stellt die auf eins normierte spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion der Versuchsperson O.M. (offene Kreise) der von Richards und Luria (82) experimentell bei der mesopischen Leuchtdichte "dim" gefundenen auf eins normierten Hellempfindlichkeitsfunktion gegenüber (s. a. F.22.). Man beachte jedoch, daß der beiden Kurven zugrunde liegende Leuchtdichtebereich und die Beobachtungsbedingungen nicht exakt übereinstimmen, was wohl am ehesten die Abweichung beider Kurven voneinander zu erklären vermag. Die von mir ermittelte Hellempfindlichkeitskurve liegt zwischen Richards' "dim"- und "dark" - Kurve (82). Die Schnittspur der Alychnenebene mit der Einheitsebene

$B_{10} + G_{10} + R_{10} = 1$ bzw. $X_{10} + Y_{10} + Z_{10} = 1$ stellt sich in den Abbildungen 8 - 11 als Spur der Alychne dar. In Tabelle 13 ist die Gleichung der Alychnenspur in der modifizierten B_{10}, G_{10}, R_{10}-Farbtafel und in der CIE-Farbtafel (1964) für den Großfeldbeobachter angegeben.

Tab. 13

Vp.	B, G, R - System (N2)	CIE-System (1964)
O.M.	g = - 35,2737 r - 9,5263	y = - 0,00052 x - 0,0532
W.P.	g = 78,0222 r + 23,2222	y = - 0,0284 x - 0,0711

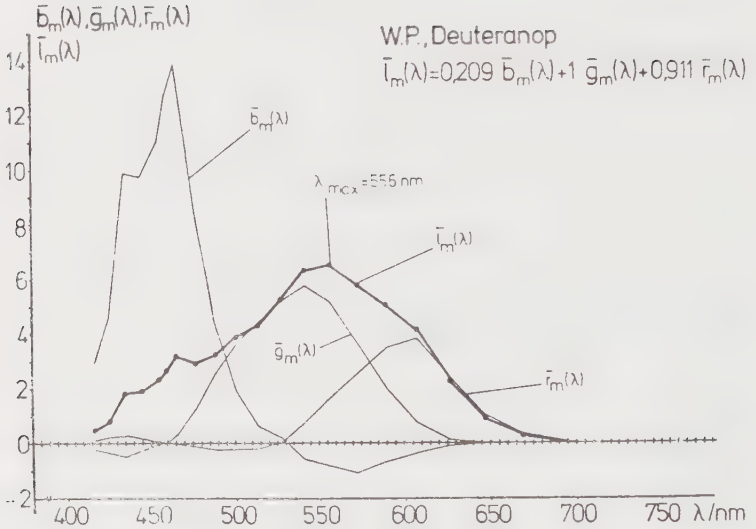


Abb. 15: Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion $\bar{l}_m(\lambda)$ der Versuchsperson W.P. bei mesopischem Leuchtdichteniveau unter "nahezu" Großfeldbedingungen.

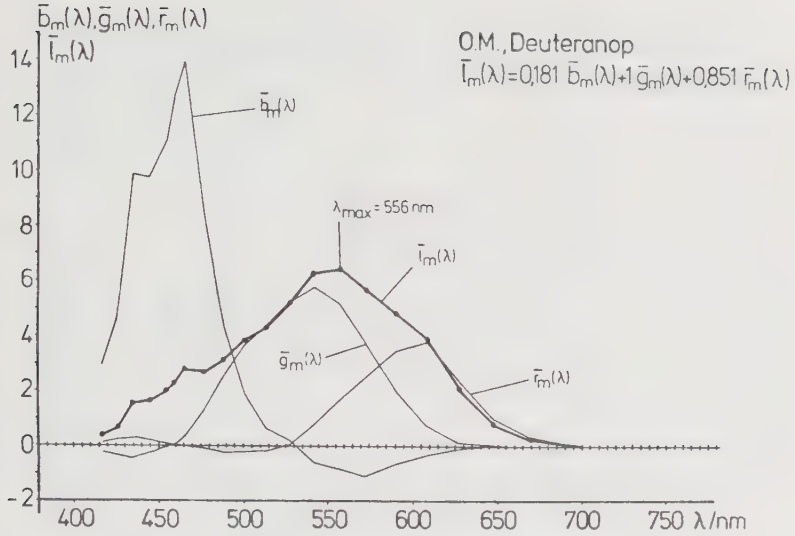


Abb. 16: Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion $\bar{l}_m(\lambda)$ der Versuchsperson O.M. bei mesopischem Leuchtdichteniveau unter "nahezu" Großfeldbedingungen.

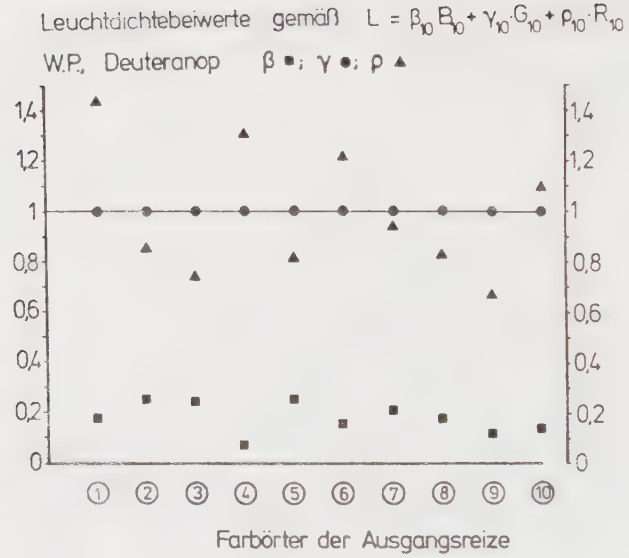


Abb. 17: "Lokale" Leuchtdichtebeiwerte β, γ, ρ für die Versuchsperson W.P. bei Großfeldbetrachtungsweise unter Verwendung der Wrightschen 1 : 1 Normierung in Abhängigkeit vom Farbort des Ausgangsreizes, der in Abb. 9 jeweils durch einen offenen Kreis symbolisiert ist. Die Numerierung erfolgte fortlaufend von Blau nach Gelb.

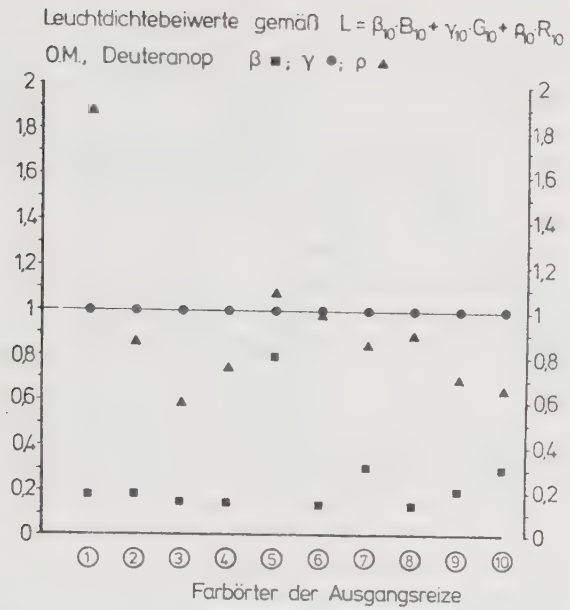


Abb. 18: "Lokale" Leuchtdichtebeiwerte β, γ, ϱ für die Versuchsperson O.M. bei Großfeldbetrachtungsweise unter Benutzung der Wrightschen 1 : 1 Normierung in Abhängigkeit vom Farbort des Ausgangsreizes, der in Abb. 8 jeweils durch einen offenen Kreis symbolisiert ist. Die Numerierung erfolgte fortlaufend von Blau nach Gelb.

Abb. 19: Vergleich der spektralen Hellempfindlichkeitskurve der Vp. O.M. (siehe dazu auch Abb. 16) mit der von Richards und Luria (82) bei einem ähnlichen Leuchtdichteniveau ermittelten Hellempfindlichkeitsfunktion. Beide Kurven sind bei logarithmischer Skalierung der Ordinate auf eins normiert.

F.24. Der Konvergenz - Abgleich

Die Abbildungen 20 u. 21 zeigen die Farbörter von Konvergenzvalenzen (= Farbvalenzen, die durch Konvergenz-Abgleiche entstanden sind) mit den Farbörtern ihrer entsprechenden Ausgangsreize (offene Kreise) in der modifizierten (N2) B_{10}, G_{10}, R_{10} - Farbtafel. Aus diesen Abbildungen geht hervor, daß Ausgangsreiz (offener Kreis) und zugehörige Konvergenzvalenz (Punkt) sich auf ein und dieselbe isochromatische Linie in der Farbtafel projizieren. Aus der Methodik des Konvergenz-Abgleichs folgt, daß Ausgangsreiz und Konvergenzvalenz derselben dichromatischen Farbvalenz angehören. Um die naheliegende Annahme, einer gesamten Verwechslungsgeraden könne genau eine Konvergenzvalenz zugeordnet werden, zu widerlegen, wurden für je zwei dichromatisch identische, trichromatisch jedoch unterschiedliche Farbvalenzen die zugehörigen Konvergenzvalenzen bestimmt. Die Abbildungen 22 u. 23 zeigen für diesen Fall, daß verschiedenen Farbörtern einer Verwechslungsgeraden in der Farbtafel auch verschiedene Konvergenzfarbörter zugehörig sind. Im Experiment konnte gar gezeigt werden, daß zwei trichromatischen Farbvalenzen einer dichromatischen Klasse zwei verschiedene Konvergenzvalenzen entsprechen.
Die Unabhängigkeit des Konvergenz-Abgleichs von extrem gewählten Ausgangsbedingungen wird in den Abbildungen 25 u. 26 an zwei Beispielen demonstriert.
Ein fünf- bis zwölffacher Wechsel des Leuchtdichteniveaus führte bei Durchführung des Konvergenz-Abgleichs in der Regel zum Konvergenzpunkt. Die Abbildungen 24. 1 - 10 zeigen den Verlauf von Konvergenz-Abgleichen der zehn Ausgangsreize, die in Abb. 21 als offene Kreise eingezeichnet sind. Die Numerierung der Abbildungen 24. 1 - 10 entspricht der Numerierung der Ausgangsreize in Abb. 21. Die Abszisse zeigt den n-ten Niveausprung an.

Konvergenz-Abgleiche in der (g,r)-Farbtafel nach Wright

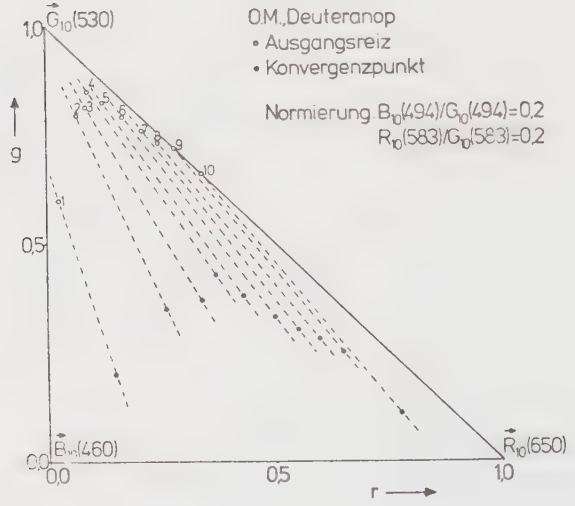


Abb. 20: Ausgangsreize (offener Kreis) mit den zugehörigen aus konvergierenden Abgleichen durch die Versuchsperson O.M. hervorgebrachten Konvergenzpunkten (ausgefüllter Kreis). Ausgangsreiz und entsprechender Konvergenzpunkt liegen auf ein und derselben isochromatischen Linie (gestrichelt eingezeichnet) in der Farbtafel.

Konvergenz-Abgleiche in der (g,r)-Farbtafel nach Wright

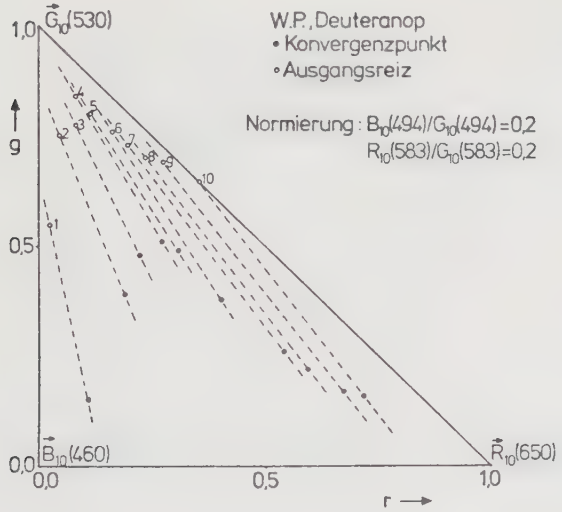


Abb. 21: Ausgangsreize (offener Kreis) mit den zugehörigen aus konvergierenden Abgleichen durch die Versuchsperson W.P. hervorgebrachten Konvergenzpunkten (ausgefüllter Kreis). Ausgangsreiz und entsprechender Konvergenzpunkt liegen auf ein und derselben isochromatischen Linie (gestrichelt eingezeichnet) in der Farbtafel.

Konvergenz-Abgleiche in der (g,r)-Farbtafel nach Wright

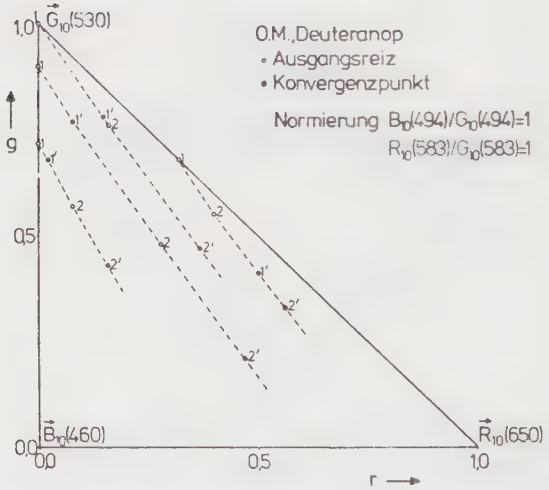


Abb. 22: Konvergenzpunkte (gestrichene Zahl) je zweier verschiedener auf ein und derselben Verwechslungsgeraden (gestrichelt eingezeichnet) liegenden Ausgangsreize der Versuchsperson O.M. bei Großfeldbetrachtungsweise. Die mit der gleichen Zahl versehenen Farbörter gehören jeweils zusammen.

Konvergenz-Abgleiche in der (g,r)-Farbtafel nach Wright

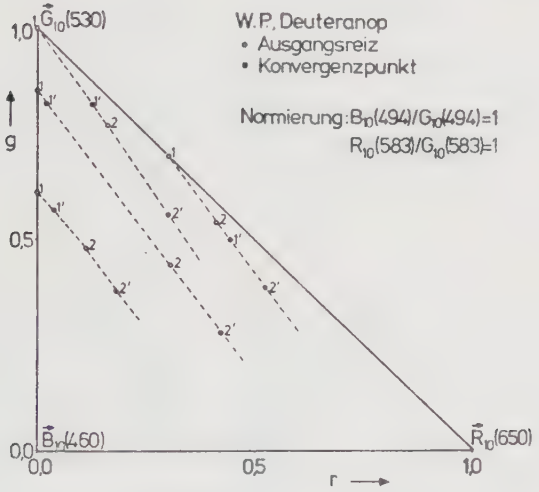


Abb. 23: Konvergenzpunkte (gestrichene Zahl) je zweier verschiedener auf ein und derselben Verwechslungsgeraden (gestrichelt eingezeichnet) liegenden Ausgangsreize der Versuchsperson W.P. bei Großfeldbetrachtungsweise. Die mit der gleichen Zahl versehenen Farbörter gehören jeweils zusammen.

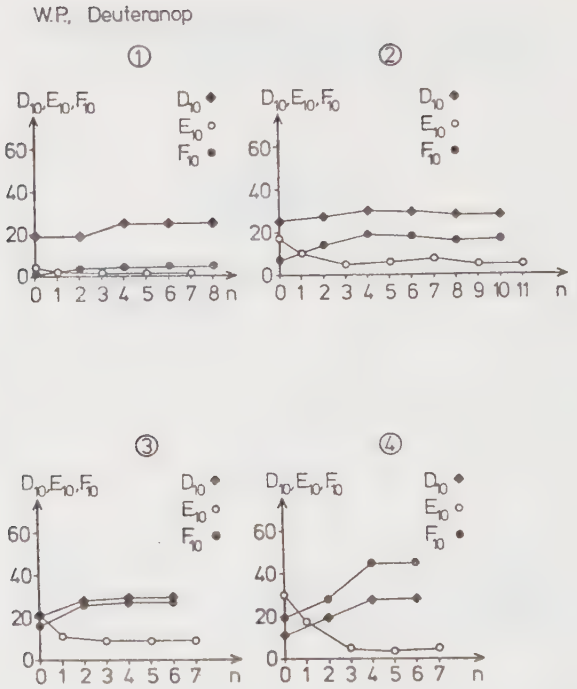
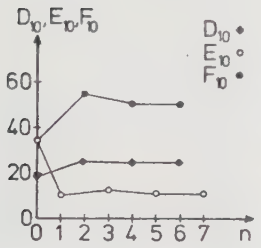


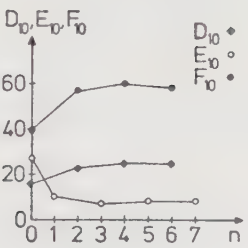
Abb. 24. 1-10: Verlauf der Konvergenz-Abgleiche der Versuchsperson W.P. der zehn Ausgangsreize, die in Abb. 21 als offene Kreise eingezeichnet sind. Die Numerierung der Abb. 24 entspricht der Numerierung der Ausgangsreize in Abb. 21. Die Abszisse zeigt den n-ten Niveausprung an. (Für n=gerade ∿ photopisches Niveau, für n=ungerade ∿ skotopisches Niveau.)
Bei n=o ist der photopische Ausgangsabgleich des normalen Trichromaten (der in der Regel mit dem des Dichromaten übereinstimmte) eingestellt. Auf der Ordinate sind die Farbwerte der Geräteprimärvalenzen aufgetragen.

W.P. Deuteranop

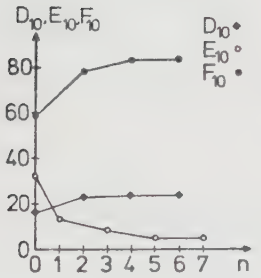
⑤



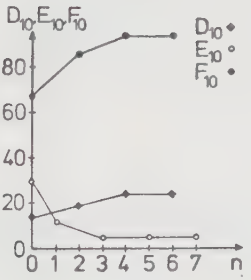
⑥



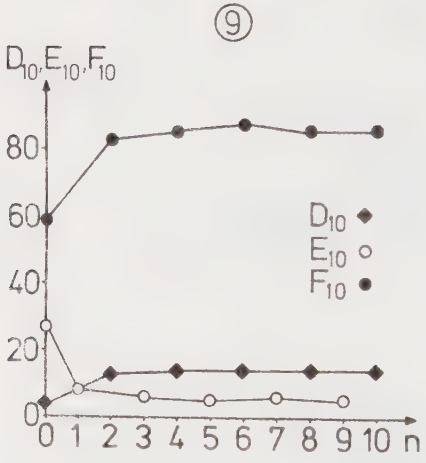
⑦

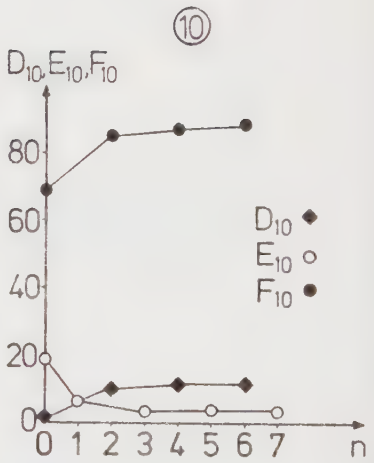


⑧



W.P. Deuteranop





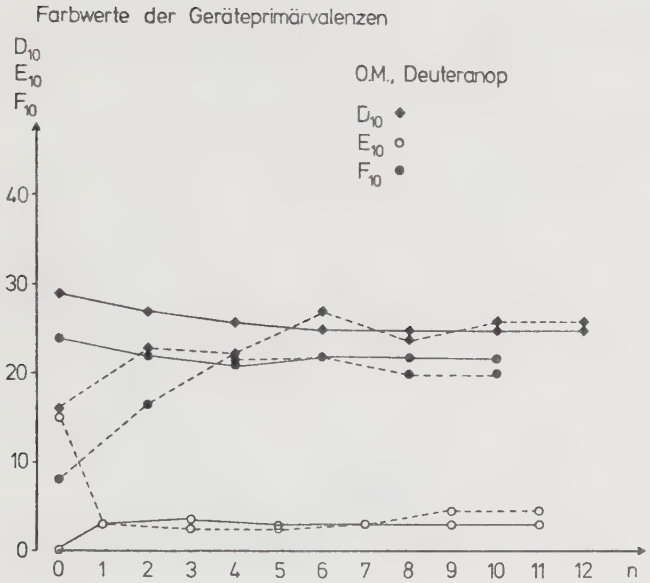


Abb. 25: Verlauf des Konvergenz-Abgleiches eines bestimmten Ausgangsreizes unter zwei verschiedenen Ausgangsbedingungen. Gestrichelte Kurven: Konvergenz-Ausgang vom Abgleich eines normalen Trichromaten;
Durchgezogene Kurven: Konvergenz-Ausgang von einem rein dichromatischen Abgleich (G=o)
Der Konvergenz-Abgleich der Versuchsperson O.M. ist offenbar unabhängig von dem trichromatischen Ausgangsabgleich des Deuteranopen. Die Abszisse zeigt den n-ten Niveausprung an (n=gerade ↷ photopisches Niveau, n=ungerade ↷ skotopisches Niveau). Bei n=o ist der photopische Ausgangsabgleich eingestellt.

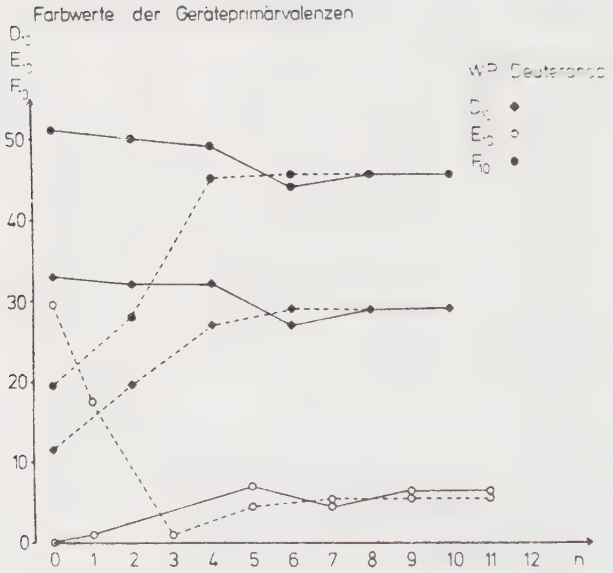
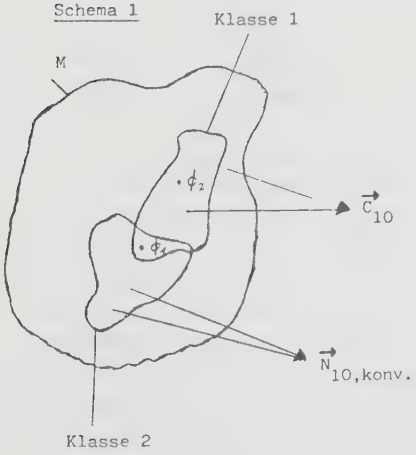


Abb. 26: Verlauf des Konvergenz-Abgleiches eines bestimmten Ausgangsreizes unter zwei verschiedenen Ausgangsbedingungen der Versuchsperson W.P. . Weitere Erläuterungen in Abb. 25.

F.25. Algebraische Beziehungen zwischen Farbenräumen verschiedener Dimension und Gesichtsfeldgröße

Die Konvergenz-Abgleiche dichromatischer Versuchspersonen liefern "Farbvalenzen", die sich als Linear-Kombination der drei Primärvalenzen $\vec{B}_{10}$, $\vec{G}_{10}$ und $\vec{R}_{10}$ schreiben lassen. Die besondere Eigenschaft dieser Abgleiche besteht darin, daß sie sowohl auf dem mesopischen Experimentierniveau als auch auf dem skotopischen Niveau Gültigkeit haben. Der "Farbenraum" dieser Konvergenzvalenzen, der Konvergenzfarbenraum ist offensichtlich ein dreidimensionaler linearer Raum, wenn man bedenkt, daß Trezona (133) Linearität bei vierdimensionalen Konvergenz-Abgleichen normaler Trichromaten fand. Die Reduzierung um einen Zapfenrezeptor-respective eine Primärvalenzdarf nach den Regeln der linearen Algebra nichts an den Linearitätseigenschaften eines Vektorraumes ändern. Zwischen dem trichromatischen 2°-Farbenraum und dem 10°-Konvergenzfarbenraum eines Deuteranopen (vorausgesetzt, er ist tatsächlich linear) besteht eine Isomorphismus, was keinesfalls eine Transformationsmöglichkeit zwischen beiden Räumen einschließt. Um das Verhältnis vom Großfeld-(10°)-Farbenraum zum 10°-Konvergenzfarbenraum eines Deuteranopen durchsichtiger werden zu lassen, betrachte der Leser folgendes Schema:

Schema 1

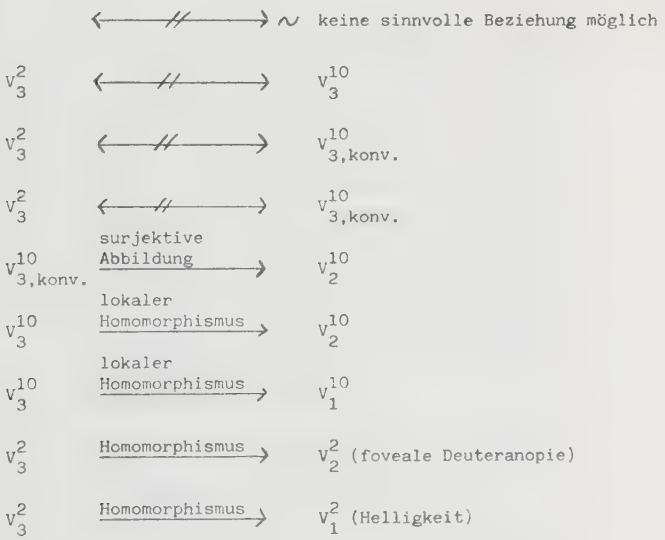


M: Farbreizmenge
ϕ_i: Farbreize
Klasse 1 ist aus der Äquivalenzrelation "gleichfarbig wie" durch einen normalen Trichromaten, Klasse 2 aus der Äquivalenzrelation "gleichfarbig wie -photopisch und skotopisch" durch einen Deuteranopen hervorgegangen.

Die Äquivalenzrelation "gleichfarbig wie" nimmt auf der Menge der Farbreize M eine Klasseneinteilung vor. Jeder Klasse läßt sich dann genau eine Farbvalenz zuordnen. Die Klasseneinteilung ist natürlich abhängig von der die Gleichfarbigkeit beurteilenden Person und von der Art der Abgleichmethode bzw. ihres Geltungsbereiches. Der normale Trichromat ordnet dem Farbreiz ϕ als Repräsentant der Klassen 1 und 2 die trichromatische Großfeldvalenz $\vec{C}_{10}$ bei dem üblichen Farbabgleich zu, der Großfelddeuteranop jedoch weist demselben Farbreiz in einem Konvergenz-Abgleich die dreidimensionale Großfeldkonvergenzvalenz $\vec{N}_{10}$ zu. Mathematisch ist eine bijektive Zuordnung zwischen den trichromatischen Großfeldvalenzen und deuteranopischen Großfeldkonvergenzvalenzen durchaus möglich, eine sinnvolle physiologische Relation kann ich jedoch aufgrund der unterschiedlichen Klasseneinteilung auf der Menge der Farbreize nicht zustande bringen. Denn einem Farbreiz, der in Klasse 1 und nicht in Klasse 2 liegt, würde zwar von einem normalen Trichromaten die Großfeldvalenz $\vec{C}_{10}$ zugeordnet, der gleiche Reiz könnte aber von einem Deuteranopen in einem Konvergenz-Abgleich nicht durch die Konvergenzvalenz $\vec{N}_{10}$ eindeutig dargestellt werden (aber durch eine andere Konvergenzvalenz). Man stelle sich zwei Farbreize ϕ_1, ϕ_2 unterschiedlicher "Stäbchenvalenz" vor. Diesen sei ein und dieselbe Großfeldvalenz $\vec{C}_{10}$ zugeordnet. Die zugehörigen Konvergenzvalenzen $\vec{N}_1$, $\vec{N}_2$ sind dann sicher verschieden, wenn man bedenkt, daß der Konvergenz-Abgleich auch im Skotopischen Gültigkeit hat. Der Großfeldvalenz $\vec{C}_{10}$ läßt sich sinnvoll nicht eindeutig eine Konvergenzvalenz zuordnen. Eine zweckmäßige Zuordnung zwischen den Valenzen des 2°- und 10°-Farbenraumes eines normalen Trichromaten scheitert ebenfalls an der unterschiedlichen Klasseneinteilung auf der Menge der Farbreize bei Wechsel der Gesichtsfeldgröße. Die Zuordnungsvorschrift die durch Herausziehen der 2°-Gesichtsfeldblende der 2°-Farbvalenz die entsprechende 10°-Farbvalenz des Reizes ϕ an die Seite stellt, erfüllt nicht die Voraussetzung einer mathematischen Abbildung (52). Wenn es auch keine algebraische Beziehung ist, die Neuigkeiten ans Tageslicht bringt, so trägt doch die folgende Beziehung zwischen Konvergenzraum und dichromatischen 10°-Farbenraum dazu bei, Begriffe farbmetrischer und algebraischer Herkunft zu verdeutlichen und gegeneinander abzugrenzen: Jeder Konvergenzvalenz werde die Nebenklasse zum Kern zugeordnet, die durch den Endpunkt der Konvergenzvalenz geht und im V_2 die entsprechende dichromatische

Farbvalenz darstellt. Diese Abbildung ist surjektiv; die Klassenbildung, induziert durch die Äquivalenzrelation "gleichfarbig wie" auf der Menge der Farbreize - ausgeführt durch einen Deuteranopen bei Großfeldbeobachtung - ist eine echte Vergröberung der Klasseneinteilung, die durch die Äquivalenzrelation "gleichfarbig photopisch und skotopisch" hervorgerufen wird. Schema 2 faßt noch einmal die farbmetrisch wichtigen Beziehungen zwischen den einzelnen Farbenräumen zusammen, wobei der obere Index ein Hinweis auf die benutzte Gesichtsfeldgröße ist, der untere Index für die Dimension des Raumes und die Art des Abgleiches steht.

Schema 2:



G. Diskussion

G.26. Dichromatische oder trichromatische Wahrnehmung "klassischer" Deuteranopen bei großen Reizflächen?

Vor 75 Jahren beobachtete Nagel (67, 68), daß es Deuteranope gibt (Kleinfelddeuteranope), die bei hinreichend großem Reizfeld rot-grüne Farbunterschiede wahrzunehmen vermochten. Experimente von Smith und Pokorny (109) bestätigen für eine kleinere Anzahl von Versuchspersonen Nagels Beobachtungen dahingehend, daß sie bei "klassischen"Dichromaten auf großem Feld typische trichromatische Eigenschaften aufdeckten. Nagy (69) stellte fest, daß bei Einstellung von Großfeld-Rayleighgleichungen nach Rhodopsinbleichung sieben von acht "klassischen" Dichromaten eindeutige trichromatische Abgleiche zustande brachten. Die Farbabgleiche von sechs dieser sieben Dichromaten stimmten mit vorhergesagten Abgleichen einfacher protanomaler bzw. deuteranomaler Personen überein. Bei Stäbchen-einmischung nahmen die Abgleiche eine Form an, die auf eine Beteiligung des Zapfen- und des Stäbchenmechanismus' hindeuteten. Die eindeutigen trichromatischen Abgleiche dieser Dichromaten nach Rhodopsinbleichung erweckten den Eindruck, als besäßen jene Dichromaten einen schwachen dritten Zapfenmechanismus, der unter gegebenen Bedingungen die Farbdiskrimination lieferte. Diese Vorstellung unterstützen auch Piantanida et al (78). Smith und Pokorny (109) schreiben die Eindeutigkeit von trichromatischen Großfeld-Rayleighabgleichen Deuteranoper der Stäbchenmitbeteiligung genauso wie dem verbliebenen langwelligen Zapfentyp zu. Sie schlossen aus der Treffsicherheit der Farbbenennung Protanoper und Deuteranoper, daß das die Unterscheidung vermittelnde Agens ein Mechanismus mit Zapfenkinetik und von der Spektralempfindlichkeit des Rhodopsins ist. Gordon und Abramov (26) weisen in diesem Zusammenhang auf die Feldgröße als einen wichtigen Faktor hin, der für die Dimensionalität normaler Farbwahrnehmung entscheidend ist, weil ihrer Meinung nach durch die periphere Verteilung der Zapfen eine adäquate Reizung aller Farbmechanismen erst bei großer Reizfläche gewährleistet ist. Aus dem Unvermögen, die Präsenz eines dritten schwachen Mechanismus' durch retinale Densitometrie (90) nachzuweisen, sollte nicht auf das Fehlen eines solchen Mechanismus' voreilig geschlossen werden, versagt doch diese Methode auch da, wo ein drittes anomales Zapfenpigment

vorhanden ist (nämlich bei den anomalen Trichromaten), aber nicht mit dieser Methode nachgewiesen werden kann. Ergänzend dazu berichten Ruddock (85), MacLeod und Lennie (57), daß Dichromaten auf kleinen peripheren Gesichtsfeldern dichromatisch bleiben. Deshalb scheint die Summation über große Netzhautgebiete ein wichtiger Aspekt dichromatischer Farbunterscheidung zu sein, ein ähnliches Phänomen, wie es in der extremen Peripherie der normale Trichromat zeigt. So ist bei Wooten und Wald (146) nachzulesen, daß Felder von mehr als 30° peripherer Netzhautlokalisation dem normalen Trichromaten rot-grünblind erscheinen, oberhalb 60° sogar nur monochromatisch. Sie fanden jedoch keinen Farbmechanismus, der zentral vorhanden war und zugleich peripher fehlte. Andererseits bedienten sich ihre Dichromaten peripher keiner Zapfenmechanismen, die nicht auch foveal aufzufinden waren. Wooten und Wald erklären die periphere Dichromasie normaler Dichromaten durch eine Fusion auf neuronaler Ebene "irgendwo zwischen Rezeptor und Zentrum".

Jaeger und Kroker (33) fanden zwei von sieben Deuteranopen und sechs von neun Protanopen, die keinen neutralen Punkt ausfindig machen konnten. Jene Probanden nannten sie "inkomplette Dichromaten", im Vergleich zu denen, die auch auf großem Feld dichromatische Abgleiche anerkannten. Eigene und fremde Experimente veranlaßten auch Nagy und Boynton (70) dazu, zwischen rot-grünen Dichromaten, die eine residuale Trichromasie zeigen, und Personen "kompletter" Dichromasie zu unterscheiden.

Boynton und Scheibner (11) bzw. Scheibner und Boynton (103) wurden darauf aufmerksam, daß einige ihrer Dichromaten Schwierigkeiten hatten, bei Farbbenennungsexperimenten mit einem Okular eines Gesichtswinkels von 3° (also unter Bedingungen, die eine Teilhabe der Stäbchen ausschließen) einen neutralen Punkt auszumachen. Sie kamen zu der Ansicht, daß die Fähigkeit, rot-grüne Unterscheidungen treffen zu können, eine allgemeine Eigenschaft der Dichromasie sein könnte. Smith und Pokorny (109) fügen hinzu, daß dreidimensionale Abgleiche ihrer Dichromaten auf großem Feld sogar leuchtdichteinvariant(Permanenz der Farbgleichung) und trichromatisch eindeutig waren. Grützner (27) dagegen stellt fest, daß seine Dichromaten auf dem Großfeld keinen weiteren Freiheitsgrad zum Farbabgleich benötigten.

Die Erstellung ununterbrochener Verwechslungsgeraden über die

gesamte Farbtafel unter definierten Beobachtungsbedingungen (E.16.) durch meine beiden Versuchspersonen bei mesopischer Großfeldbetrachtung lassen keinen Zweifel daran, daß es sich um "komplette" Dichromaten im Sinne von Jaeger und Kroker (33) handelt. Die Tatsache, daß Konvergenz-Abgleiche von Ausgangsreizen über die gesamte Farbtafel hinweg überhaupt möglich sind, spricht ebenso für die "komplette" Deuteranopie meiner beiden Versuchspersonen. Die sogenannte "komplette" Großfeld-Deuteranopie kann in Analogie zur Fusionsdeuteranopie gesehen werden, d. h. die skotopischen Signale werden in den (morphologisch auf dem retino-genikulären Niveau bestehenden) Blau-Gelb-Kanal und den Helligkeitskanal "gepreßt". Als Folge davon verliert die Blau-Gelb-Erregung den Charakter einer luminanzfreien Chrominanz, mit anderen Worten, Stäbchensignale tragen zur Blau- und Gelbempfindung bei, aber nicht mehr helligkeitsfrei. Die Verwechslungsfarben sind bei Großfeldbetrachtungsweise andere als bei Kleinfeldbeobachtung. Der mathematische Hintergrund dafür ist die unterschiedliche Klassenbildung auf der Menge der Ausgangsreize bei beiden Beobachtungsbedingungen. Das geometrische Korrelat dieser Behauptung besteht in dem unterschiedlichen Verlauf der Verwechslungsgeraden (s. Abb. 6, 7, 8, 9, 12) in der Farbtafel bei Großfeld-bzw. Kleinfeldbetrachtungsweise. Der unterschiedliche Verlauf ist Ausdruck von Gelb-Blau Sättigungsdifferenzen.

G.27. Der Feldgrößeneffekt

Seit der Arbeit Purkinjes (80) 1825 weiß man, daß sich die von einem Testreiz ausgelöste Farbempfindung ändern kann, wenn der Reiz von der Fovea zur Peripherie bewegt wird. Die Farbänderung (d. h. die Wahrnehmung) wird beeinflußt durch eine Reihe physikalischer Parameter, die wichtigsten unter ihnen sind: spektrale Zusammensetzung, Makulapigmentierung, Größe des Testreizes sowie allgemeine und lokale Adaptation (116). ÄhnlicheVerhältnisse liegen bei Erweiterung eines zentral fixierten Reizfeldes von 2° auf ein zentral fixiertes Feld von 10° vor. Während meine beiden dichromatischen Versuchspersonen lediglich eine Entsättigung beim Übergang von der Kleinfeld- zur Großfeldbetrachtungsweise bei gleichem Ausgangsreiz konstatierten, neigen die meisten Autoren dazu, neben der Entsättigung eine Bunttonverschiebung vom Roten und Grünen zum Gelben und vom Blauen zum Violetten hin aufzuzeigen (116).

Im Rahmen der Young-Helmholtz-Theorie des Farbensehens wurden die Farbempfindungsänderungen mit zunehmender Exzentrizität - nach Berücksichtigung der unterschiedlichen Pigmentierung - allgemein auf folgende Art erklärt: Die Absorptionskurven der Photopigmente verschieben sich im Spektrum derart, daß sie sich mehr überlappen und die relative Beteiligung der drei Zapfentypen ändere sich mit zunehmender Exzentrizität (56). Im Gegensatz zu dieser Annahme zeigen neue Ergebnisse, daß die spektralen Absorptionskurven der drei Zapfenphotopigmente sich quer durch die gesamte Peripherie der Netzhaut nicht ändern. Vielmehr erklären sich die beschriebenen Phänomene eher durch neurale denn durch photochemische Rezeptormechanismen (146). Um die eklatanten Differenzen zwischen Farbgleichungen, die bei Klein- bzw. Großfeldbeobachtung entstehen, dem Leser einmal vor Augen zu führen, habe ich die Farbwerte D_{10}, E_{10}, F_{10} der Geräteprimärvalenzen mit der 2°-Normierungsmatrix (D.14.) multipliziert und anschließend gemäß N1 gewichtet (Abb. 12), wodurch v. a. der Einfluß der Pigmentänderung von zentral nach peripher auf die Lage der Ausgangsreize und Verwechslungsgeraden in der Farbtafel seinen Niederschlag findet. Obwohl die physikalische Erzeugung der Primärvalenzen bei Klein- und Großfeldbetrachtungsweise dieselbe war, so bedeutet dies nicht, daß beiden Systemen Primärvalenzen mit gleicher physio-

logischer Bedeutung zugrunde lagen. Das ist vielmehr nicht möglich, weil die beiden Tripel von Spektralwertfunktionen verschiedenen physiologischen Inhalt haben und deshalb nicht ineinander umrechenbar sind. Bei einer Gegenüberstellung der Abbildungen 12 und 7 bedenke man die Verschiedenheit der Klassenbildung in beiden Systemen. Es wäre sicher zu einfach, diesem Umstand allein die signifikanten Unterschiede, nämlich daß die isochromatischen Linien im 10°-System allesamt steiler verlaufen, und die Ausgangsreize systematisch zur rot-grünen Dreiecksseite verschoben sind, anzulasten.
Von Kries (47) bemerkte bereits 1896 in seiner Arbeit über die Funktion der Netzhautstäbchen, daß foveal eingestellte Farbgleichungen peripher in der Regel nicht anerkannt wurden. Er sah in der Änderung der Makulapigmentierung von zentral nach peripher den einzigen Grund für diese Erscheinung. Bongard, Smirnov und Friedrich (12) stellten sich auf den Standpunkt, daß sich dieses Phänomen nicht zur Genüge durch die unterschiedliche Makulatingierung peripherer und zentraler Netzhautanteile erklären lasse, da ja auch Farbreize, deren spektrale Zusammensetzung ausschließlich Strahlung größerer Wellenlänge als 540 nm enthalte, dieser Erscheinung sich nicht entziehen könne, obschon der Makulapigmenteinfluß auf solche Reize aufgrund seiner Absorptionseigenschaften vernachlässigt werden kann. Grützner (27) wiederum weist in seiner Dissertation darauf hin, daß Personen mit sehr starker Makulapigmentierung ein so steiles makulares Gefälle von zentral nach peripher bezüglich der blauen Farbempfindung aufzeigen , daß Unterschiede von nur 0,5° Gesichtswinkel schon merkliche Abweichungen zentral eingestellter Gleichungen bewirken.
Die Stäbchenpräsenz in peripheren Netzhautarealen beeinflußt über einen weiten Leuchtdichtebereich die Komposition eines peripheren Farbabgleichs (115). Von Kries führte die Abhängigkeit peripher ermittelter Farbgleichungen von der Leuchtdichte auf verschieden stark ausgeprägte "Stäbchenvalenzen" beider Photometerfelder zurück. An dieser Stelle erhebt sich die Frage, oberhalb welcher Leuchtdichte überhaupt mit einer Stäbcheneinmischung zu rechnen ist, oder ob gemäß der Duplizitätstheorie (108)eine gleichzeitige Aktivierung von Stäbchen und Zapfen grundsätzlich abzulehnen ist. Stiles und Wyszecki (126) schreiben sowohl der Leuchtdichte wie auch der relativen Spektralverteilung eines Paares metamerer Reize Schlüsselfunktionen für die Beteiligung

der Stäbchen am Farbabgleich auf großen Gesichtsfeldern zu. Sie gehen so weit, eine mathematische Formel anzugeben, die es ermöglicht, Stäbcheneinmischung vorherzusagen.
Vorausgesetzt, es liege bei mesopischem Leuchtdichteniveau eine Stäbchenaktivierung vor, so ist damit noch nichts über die Art des von den Stäbchen bewirkten Effektes gesagt, d. h. führen sie lediglich zu einer neutralen Hellempfindung, oder vermögen sie auch eine Farbempfindung zu vermitteln und wenn ja, welche, oder beeinflussen sich Stäbchen und Zapfen gar gegenseitig? Es gibt hinreichend viele Angaben darüber, daß die Stäbcheneinmischung mit einer Entsättigung der wahrgenommenen Farbe einhergeht oder sogar den kompletten Verlust der Farbempfindung verursacht (113, 116, 117). Zu dieser Entsättigung tritt in der Region kurzer Wellenlängen des Spektrums eine Farbempfindungsänderung zu Blau hin, im lang- und mittelwelligen Bereich zu Gelb hin auf (119).
Wenn Max Schultze (106) 1866 in seiner Duplizitätstheorie den Stäbchen lediglich eine Helligkeitsempfindung unterhalb der Zapfenschwelle zugesteht, so erscheint eine Farbänderung nach Stäbcheneinmischung mit der Duplizitätstheorie unvereinbar, funktionieren doch Stäbchen und Zapfen in dieser Theorie als zwei unabghängige, separate Systeme. Die Meinung, daß Stäbchen als Blauempfindung vermittelnde Rezeptoren agieren, geht auf Ebbinghaus (1893) (19) und König (1894) (43) zurück, die die Empfindung des Blauen den Photoprodukten des Rhodopsins zuschrieben. Aber auch Willmer (143), Marks, Dobelles , MacNichol (59), Brown und Wald (19) stützten die Hypothese von den "Stäbchen als den blauen Farbrezeptoren". Nach Entdeckung des im kurzwelligen absorbierenden Sehzapfens (Marks et al. 1964 (59)), wurde jene Hypothese modifiziert und zwar in der Art, daß man sich Stäbchen und diese Sehzapfen als separate Rezeptoren vorstellte, die einen gemeinsamen Weg benutzen. U. Stabell u. B. Stabell (114) glauben Beweise dafür gefunden zu haben, daß sowohl Stäbchen wie auch Zapfen bei mesopischen Intensitätsverhältnissen eine Farbkomponente beisteuern. Sie postulieren, daß die Stäbchen sowohl bei skotopischen als auch bei mesopischen Intensitäten an der Vermittlung eines jeden Farbreizes beteiligt sein können. Nach einer Prüfung der Ähnlichkeiten und der Unterschiede zwischen Stäbchen und blauen Zapfen schlägt Trezona (131) vor, Stäbchen und blaue Zapfen als selbständige Einheiten zu betrachten, die sich an einer gemeinsamen Nervenbahn

beteiligen. Vom Standpunkt der Farbmetrik aus wäre die wichtigste Folgerung daraus die, daß die Stäbchenreizung, obwohl Stäbchen Strahlung im blau-grünen Bereich des Spektrums absorbieren, die Empfindung "blau" auslöst. 1960 diskutierte Clarke (16) eine Stäbchen-Zapfen-Interaktion, wobei die Stäbchenantwort durch Zapfenaktivität gehemmt wurde. Aguilars und Stiles' (2) Arbeiten auf diesem Gebiet lieferten Hinweise dafür, daß nur die "blauen" Zapfen an einer Hemmung der Netzhautstäbchen beteiligt sind. Den gleichen Schluß zogen Blackwell (1961) (8), Hough (1969) (32) und Trezona (131) aus ihren Beobachtungen. Unter den möglichen Beziehungen zwischen Stäbchen- und Zapfensystemen müssen generell folgende drei Verknüpfungen ins Auge gefaßt werden:

1. komplette Unabhängigkeit
2. partielle Summation

und 3. totale Summation.

Die erste Möglichkeit, Unabhängigkeit von Stäbchen- und Zapfensignalen kann sofort zurückgewiesen werden, nachdem bereits einige Autoren über Interaktionen ausführlich berichtet haben (23,10). Adaptive Interaktion zwischen Stäbchen und Zapfen wurden von Makous und Boothe (58) gefunden. W. Jarczyk (34) entwickelte eine neue Theorie des Farbensehens, die die gleichzeitige Tätigkeit von Stäbchen und Zapfen annimmt. Die Stäbchen sind seiner Meinung nach für die Unterscheidung von Blau und Gelb verantwortlich.

Daß das Mischungsverhältnis grün-roter Farbgleichungen wie z. B. der Rayleighgleichung mit wachsender Feldgröße abnimmt, führen Pokorny und Smith (110) auf exponentielle Verringerung der Zapfenpigmente nach peripher hin zurück. Da das Makulapigment Wellenlängen oberhalb von 540 nm nicht absorbiert (137 b), bietet es wenig Erklärungsmöglichkeit für die Störung von Rayleigh-Abgleichen bei Änderung der Gesichtsfeldgröße. Dagegen vermag das Linsenpigment interindividuelle Abweichungen bei der Einstellung von Rayleigh-Abgleichen zu erklären. Eine lineare Korrelation des Linsenpigmentes mit dem Alter der Versuchspersonen nehmen Said und Weale (107) an.

Nachdem eine Vielzahl von Interpretationen jener Feldgrößeneffekte aufgezählt wurde, scheint es mit sinnvoll, eine Gewichtung vorzunehmen. Die mathematische Erklärung der Feldgrößeneffekte ist die unterschiedliche Klassenbildung auf der Menge der Farbreize. Die systematische Verschiebung der Ausgangsreize zur grün-roten

Dreiecksseite ist meiner Meinung nach hauptsächlich der von zentral nach peripher hin abnehmenden Makulapigmentierung anzulasten, da diese Erscheinung auch bei hohem photopischem Niveau beobachtet werden kann. Eine Steigungsanalyse der isochromatischen Linien in der Farbtafel beider Abbildungen (6 u. 8 bzw. 7 u. 9) läßt vermuten, daß der Grad der Stäbchenaktivierung in Korrelation zur Steigung der Verwechslungsgeraden steht. Aus der Steigungsänderung auf die Art des Stäbchenmechanismus zu schließen, hieße in das komplexe Geschehen der di- und trichromatischen Klassenbildung einzusteigen.

G. 28. Fehlfarben

Die Fehlfarbe charakterisiert den Typ der Dichromasie. Im dreidimensionalen Farbenraum des normalen Trichromaten stellt der Fehlfarbenrichtungsvektor einen Vektor dar, der die Richtung fehlender Farbunterscheidung des Dichromaten angibt. Auf Helmholtz (29) und Maxwell (60) geht die Betrachtungsweise der Fehlfarbe als Grundvalenz zurück. In dieser Betrachtungsweise sind die Fehlfarben der drei Typen der Dichromasie die Primärvalenzen, auf die die Grundpsektralwertkurven des normalen Trichromaten bezogen sind. Die von mir gewählte Methode der Fehlfarbenbestimmung wurde schon 1855 von Maxwell (60) beschrieben und 1957 von Nyberg und Yustova (73) wieder aufgegriffen.

G.28.a. Fehlfarben bei Kleinfeldbeobachtung (2°) auf mesopischem Leuchtdichteniveau

Ebenso wie die Versuchspersonen Kröger-Paulus'(49) waren auch meine beiden Versuchspersonen dazu in der Lage, den blauen Farbwert entlang einer isochromatischen Linie unverändert zu lassen. Geometrisch bedeutet dies, daß die den Verwechslungsgeraden zugehörigen mittleren Fehlpunkte auf der Verlängerung der rot-grünen Dreiecksseite der B, G, R-Farbtafel liegen. Die Streubreite der Fehlpunkte beider Dichromaten stimmt gut mit den Ergebnissen Kröger-Paulus' überein. Lediglich der Ort des mittleren Fehlpunktes meiner beiden Versuchspersonen ist näher an die grüne Primärvalenz gerückt. Kröger-Paulus und Scheibner (48) weisen daraufhin, daß sich mit

der Lage der Fehlfarbe das Maximum der $\bar{w}$ (λ) -Kurve ändere. Mit zunehmendem Abstand des Fehlpunktes von dem Farbort der grünen Primärvalenz verschiebe sich λ_{max} der $\bar{w}$ (λ) -Kurve zu kleineren Wellenlängen hin. Ob diese "grünere" Fehlfarbe ein Zugeständnis an Alperns (3) Clusterhypothese (s. G.28.b.) ist oder gar auf das mesopische Leuchtdichteniveau zurückzuführen ist, lasse ich wegen der mangelnden Quantität der Ergebnisse dahingestellt. Die individuelle Makulapigmentierung jedenfalls dürfte wohl kaum einen Einfluß auf die Lage der Fehlpunkte haben, macht es doch die WDW-Normierung möglich, die Effekte präretinaler Absorption von denen der Rezeptoren zu trennen.

G.28.b. Fehlfarben bei Großfeldbetrachtungsweise (10°) auf mesopischem Leuchtdichteniveau

Da bislang keine Vergleichsdaten anderer Autoren bezüglich dieses Gegenstandes existieren, die meine Ergebnisse untermauern oder widerlegen könnten, beschränke ich mich darauf, die physiologische Eigenart der Großfeldergebnisse zu diskutieren. Wie schon in Abschnitt D.14. erwähnt, wurde für eine zweckmäßige zeichnerische Darstellung der Fehlfarben bei Großfeldbetrachtungsweise eine spezielle Normierung des B_{10}, G_{10}, R_{10}-Systems gewählt, die eine stärkere Gewichtung der grünen Primärvalenz mit sich bringt. Im Gegensatz zu den Kleinfeldabgleichen mußten beide Versuchspersonen bei dem Großfeldfarbabgleich auch die blaue Primärvalenz entlang einer isochromatischen Linie variieren, was letztlich dazu führte, daß die Großfeldfehlfarben eine negative blaue Komponente besitzen (s. Tab. 4). Die Abbildung 2 zeigt die Fehlfarbenrichtungsvektoren im 2°- und 10°-B, G, R - Farbenraum. In dieser Abbildung wurde Groß- und Kleinfeld (jedes für sich) nach Wright normiert und anschließend der rote Farbwert jeweils mit 0,4 (gemäß N1) multipliziert, um eine sinnvolle Gegenüberstellung zu schaffen. Dabei fällt auf, daß die Fehlfarbe im 2°-System steiler verläuft und im Gegensatz zu den Verhältnissen im 10°-System innerhalb der Ebene, die von $\vec{G}_{10}$ und $\vec{R}_{10}$ aufgespannt wird, liegt. Beide Versuchspersonen weisen für das Großfeld einen negativen Blauanteil in der Komponentenschreibweise des normierten Fehlfarbenrichtungsvektors auf. Deshalb liegt der Fehlpunkt im 10°-System auch nicht auf der Verlängerung der rot-grünen Dreiecksseite. Abb. 2 b

demonstriert die Fehlfarbenrichtungsvektoren in der "0,2-Normierung." Die von mir gewählte spezielle Großfeldnormierung (s. D.14.) läßt beide Fehlpunkte oberhalb der rot-grünen Dreiecksseite in der Farbtafel erscheinen. Aus der Lage des Fehlpunktes bzw. aus den Farbwerten des Fehlfarbenrichtungsvektors Rückschlüsse auf physiologische Mechanismen zu schließen, scheitert an der zwiespältigen Bedeutung der Primärvalenzen in beiden Systemen. Dennoch wage ich an dieser Stelle eine Hypothese aufzustellen, deren Bestätigung noch weiterer Experimente bedarf. Meiner Meinung nach sind in der ermittelten deuteranopischen mesopischen Großfeldfehlfarbe die photopische Großfeldfehlfarbe eines "kompletten" Deuteranopen und eine den Stäbchenmechanismus charakterisierende Farbart miteinander vereinigt. Diese These lehnt sich eng an Trezonas (131) Ausführungen über "die Stäbchenpartizipation am blauen Mechanismus" an, die Stäbchenaktivierung im Mesopischen verursache eine blaue Farbempfindung, was den blauen Anteil der Großfeldfehlfarbe erklären könnte. Die moderne Gegenfarbentheorie läßt das Problem des Wechsels der Stäbchenfarbe von neutral nach blau bei Änderung des Leuchtdichteniveaus vom Skotopischen zum Mesopischen nicht mehr unmöglich erscheinen. Zur Zeit sehe ich jedoch keine Möglichkeit, die eine präzise Isolierung jenes vermeintlichen chromatischen Stäbchenmechanismus gestattet.
Ein Vergleich beider Versuchspersonen bezüglich der Lage der Fehlpunkte zeigt, daß diese nicht aus einer Grundgesamtheit stammen können. Die systematische Verschiebung der Stichproben beider Versuchspersonen (s. Abb. 8 u. 9) lassen die Heranziehung eines statistischen Testes unnötig erscheinen. Alpern folgert aus der Tatsache, daß es interpersonell kein einheitliches Absorptionsmaximum eines Zapfenpigmentes, sondern eine Streuung in einem bestimmten Wellenlängenbereich gibt, die Zapfenpigmente lägen in sogenannten Clustern vor (3,4,5). Kröger-Paulus und Scheibner (48) sowie Stöcker (127) bestätigen im übrigen die Theorie Alperns bei Kleinfeldbeobachtung. Der zusätzliche Einfluß des Stäbchenmechanismus' und die Variation des blauen Farbwertes bei der Aufstellung von Verwechslungsgeraden führen im Großfeld unter mesopischen Bedingungen zu noch größeren interindividuellen Streuungen, die in Analogie zu Alperns Zapfen-Clustern auch die Existenz von Stäbchen-Clustern wahrscheinlich machen. Erythrolabcluster, Cyanolabcluster und Rhodopsincluster sind eine mögliche Erklärung für die interindivi-

duelle Variation der Großfeldfehlfarben. Die Betrachtung der mesopischen Großfeldfehlfarbe f_{10} als Kern einer "lokal" homomorphen Abbildung eines "lokal dreidimensionalen linearen Farbenraumes" auf einen "lokal zweidimensionalen linearen Farbenraum" führt zur Aufstellung zweier mesopischer deuteranopischer Spektralwertkurven $\bar{k}_{10}$ (λ) und $\bar{w}_{10}$ (λ) mit den zugehörigen Primärvalenzen $\vec{k}_{10} \overset{\text{def.}}{=} \vec{B}_{10}$ (460 nm) und $\vec{W}_{10} \overset{\text{def.}}{=} \vec{R}_{10}$ (650 nm). Die von Richards und Luria (82) im Jahre 1964 für die Primärvalenzen $\vec{A}$, $\vec{H}$, $\vec{C}$ (s. F.22.) experimentell ermittelten Spektralwertfunktionen wurden zu dem Zweck ins B, G, R-System transformiert und als trichromatische mesopische Spektralwertkurven der mathematischen Reduktion zugrunde gelegt. Die ursprünglichen Spektralwertkurven $\bar{a}$ (λ), $\bar{h}$ (λ), $\bar{c}$ (λ) wurden mit Hilfe eines 2° Gesichtsfeldes 3° 20' parafoveal aufgenommen. Die dabei herrschende Leuchtdichte erstreckte sich - je nach Farbreiz - von 0,0013 bis 1,26 Trol (="dim"-Bereich). Der Umstand, daß die Richardsschen Primärvalenzen visuell am DFM nachgemischt wurden, um eine Transformation ins B, G, R-System vorzunehmen, ist schuld daran, daß sich die blaue und rote Spektralwertkurve nicht exakt bei 530 nm schneiden (s. Abb. 13, 14, 15 u. 16).

Richards und Luria (82) stellten fest, daß bemerkenswerte Differenzen zwischen den Spektralwertfunktionen unterschiedlicher retinaler Position in der Weise bestehen, daß die fovealen Werte verglichen mit den Parafovealen für die grüne Primärvalenz zwischen 526 nm und 465 nm niedriger, für die blaue Primärvalenz zwischen 417 nm und 444 nm höher liegen. Für die Einstellung der Trendelenburggleichung wie auch der Farbabgleiche aller übrigen Ausgangsreize meiner beiden Versuchspersonen kann ich dies ausdrücklich bestätigen. Richards und Luria sind der Ansicht, diese Effekte seien durch Makulapigment und Rhodopsin bedingt. Allerdings könne man auch nicht, betrachtet man das Verhältnis der jeweiligen Farbwerte der Primärvalenzen fovealer und parafovelaer Abgleiche, allein die Makulapigmentdifferenzen der verschiedenen Netzhautareale verantwortlich machen. Außerdem weisen sie auf den gravierenden Unterschied in der Größe des blauen Farbwertes beim Abgleich eines Testreizes auf einem 10°-zentral fixierten Feld und einem 2°-parafoveal betrachteten Gesichtsfeld hin. Grund genug, die Ergebnisse dieser Arbeit (die teilweise durch eine Vermengung beider Beobachtungsbedingungen entstanden sind) kritisch aufzunehmen

in dem Bewußtsein, daß der Netzhautlokalisation und der Größe der retinalen Reizfläche eine enorme Bedeutung zukommt.
Im Vergleich zu den Ergebnissen Kröger-Paulus' (49) und Scheibners (100), die auf kleinem Feld bei photopischem Niveau mit Deuteranopen unter sonst gleichen Versuchsbedingungen arbeiteten, unterscheidet sich die dichromatische $\bar{k}_{10m}(\lambda)$-Kurve meiner beiden Versuchspersonen erheblich von der trichromatischen $\bar{b}_m(\lambda)$-Kurve (s. Abb. 13, 14). Der Blauanteil der Großfeldfehlfarbe impliziert ohne Zweifel diese Erscheinung. Beide Versuchspersonen weisen bei 526 nm in ihrer blauen Spektralwertkurve $\bar{k}_{10m}(\lambda)$ ein Nebenmaximum auf. Eine physiologische Interpretation dieses Phänomens erscheint mir erst nach Bezugnahme auf die Großfeldgrundvalenzen sinnvoll. Dies ist jedoch zur Zeit mangels Kenntnis der blauen und roten Grundvalenz nicht möglich.
Die kurzwellige deuteranopische Spektralwertkurve $\bar{k}_{10m}(\lambda)$ repräsentiert den erhalten gebliebenen kurzwelligen deuteranopischen Mechanismus, die langwellige deuteranopische Spektralwertkurve $\bar{w}_{10m}(\lambda)$ den erhalten gebliebenen langwelligen deuteranopischen Mechanismus. Dies ist jedoch nur dann richtig, wenn man den Einfluß der Stäbcheneinmischung vernachlässigt.
Ein Grund dafür, daß die Stäbchen den Verlauf einer mesopischen Spektralwertkurve beeinflussen, ist der Trend zur Identität fovealer und parafovealer Spektralwertkurven bei ansteigender Leuchtdichte (82). Da die meisten Forscher heute dazu neigen, den Stäbchen auf mesopischem Niveau einen chromatischen Effekt zuzuordnen, sollte sich auch der Stäbchenmechanismus in der Gestalt der Spektralwertkurven niederschlagen. Die Isolierung jener Stäbcheneffekte aus den Spektralwertkurven scheitert an dem stetigen Wechsel der physiologischen Bedeutung der Primärvalenzen bei Feldgrößen- und Leuchtdichteänderung. Die Spektralwertfunktionen $\bar{k}_{10m}(\lambda)$, $\bar{w}_{10m}(\lambda)$ beziehen sich auf die reellen Primärvalenzen $\vec{K}_{10} \overset{\text{def.}}{=} \vec{B}_{10}$, $\vec{W}_{10} \overset{\text{def.}}{=} \vec{R}_{10}$ des WDW-Systems und haben demzufolge negative Äste.
Eine Korrelation der kurzwelligen bzw. langwelligen Spektralwertkurve mit dem spektralen Absorptionsmaximum von Cyanolab und Rhodopsin bzw. Erythrolab ist deshalb nicht erlaubt.

3.20. Alychnen und Hellempfindlichkeitskurven bei Großfeldbetrachtungsweise auf mesopischem Leuchtdichteniveau

Newton (71) machte 1730 die Entdeckung, daß die Farben des Sonnenspektrums nicht gleich hell erscheinen und Purkinje (80) berichtete 1825, daß die Helligkeit der Farben von dem Beleuchtungsniveau abhänge. Bei extrafovealer Reizung ergaben sich zwei verschiedene Hellempfindlichkeitskurven, eine unter photopischen und eine andere unter skotopischen Bedingungen. Die photopische Kurve hatte ihr Maximum bei 560 nm und die skotopische Kurve bei 510 nm (18 b). Spektrale Hellempfindlichkeitskurven auf mesopischem Leuchtdichteniveau und großem Photometerfeld sind in der Literatur nur vereinzelt beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit habe ich auf indirektem Weg über die Aufstellung einer "mesopischen Alychne" mesopische Hellempfindlichkeitsfunktion meiner Probanden nach dem Abneyschen Gesetz konstruiert. Wegen der photometrischen Nicht-Additivität bei großflächiger Netzhautreizung habe ich den Begriff der "Intervall-Alychne" geprägt. Nur innerhalb eines begrenzten Leuchtdichtebereichs verlaufen die Isolychnen unter Großfeldverhältnissen nahezu parallel. Dieser beschränkte Raum kann annähernd als lokal linear gelten, in dem das Abneysche Gesetz erfüllt ist. Diesem Leuchtdichteintervall ordne ich die zu den Isolychnen dieses Leuchtdichtebereichs parallele durch den Nullpunkt des Farbenraumes gehende Ebene als "Intervall-Alychne" A zu. Da die Alychnenbestimmung auf einer Isolychnenbestimmung basiert, die Parallelität beliebiger Großfeldisolychnen jedoch nicht vorausgesetzt werden kann, ist die Position der Alychne im Farbenraum als eine Variable der Lage der Isolychne zu verstehen, die der Alychnenbestimmung zugrunde liegt. Eine genaue Beschreibung dieser Verhältnisse gestattet lediglich die Differentialgeometrie, deren mathematische Grundlagen und Prinzipien die niedere Farbmetrik im Sinne Schrödingers übersteigt (105), die ausschließlich auf dem Gleichheitsurteil beruht. In einem solchen System sind keine Abstände definiert.

Die Leuchtdichte verknüpft die Farbvalenzmetrik mit der Photometrie (97). Für jeden Ausgangsreiz (deren es 10 gab) wurden mit Hilfe der dort an dieser Stelle geltenden Fehlfarbe und eines dazugehörigen Quervektors Alychnen bestimmt. Die relativen Leuchtdichtebeiwerte in der 1:1 Normierung nach Wright dieser "Punkt für

Punkt" Alychnen sind in den Abbildungen 17 u. 18 dargestellt. Tabelle 14 zeigt die von Kröger-Paulus (49) auf kleinem Feld gefundenen Leuchtdichtebeiwerte gemäß der Abneyschen Gleichung in der 1:1 Normierung des WDW-Systems im Vergleich zu meinen Ergebnissen auf großem Feld.

Tab. 14

Vp.	β	γ	ϱ	Autor	Feldgröße/Normierung
C.Sch.	0,0403	1	0,996		
P. V.	0,038	1	0,850		
J.M.	0,071	1	0,832	Kröger-Paulus	2° / WDW 1:1
R.Sch.	-0,010	1	1,033		
U.W.	0,045	1	1,020		
O.M.	0,181	1	0,851		
W.P.	0,209	1	0,911	Scheufens	10° / WDW 1:1

Ein Vergleich (sofern er zwischen beiden Systemen überhaupt gestattet ist) mit den von Kröger-Paulus (s. Tab. 14) gefundenen Ergebnissen zeigt eine signifikante Zunahme des blauen Leuchtdichtebeiwertes bei großer Reizfläche. (Die Größe der Reizfläche bezieht sich auf die Experimente, auf welchen die Ermittlung der Fehlfarben und Quervektoren beruht). Der rote Leuchtdichtebeiwert scheint geringfügig kleiner zu sein als der entsprechende auf kleinem Gesichtsfeld. Eine wesentlich größere Unsicherheit bei der Bestimmung des blauen Leuchtdichtebeiwertes als bei der Bestimmung des roten Leuchtdichtebeiwertes, wie sie Paulus (76) bei Protanopen fand, kann ich für meine Versuchspersonen nicht bestätigen. Vielmehr stimme ich mit Kröger-Paulus (49), die ebenfalls mit Deuteranopen experimentierte, darin überein, daß rote und blaue Leuchtdichtebeiwerte ähnlichen relativen Schwankungen unterliegen, die in keiner Beziehung zum Farbort des Ausgangsreizes in der Farbtafel stehen. Obwohl die Daten aus der Wrightschen 1:1 Normierung hervorgegangen sind, kann der Einfluß des von zentral nach peripher hin abnehmenden Makulapigmentes bei der Diskussion um die Abweichung des blauen

Leuchtdichtebeiwertes beider Systeme nicht völlig außer Acht gelassen werden, da die Korrektur der individuellen Farbabgleiche wegen der unterschiedlichen Makulapigmentierung durch die Wrightsche 1:1 Normierung unvollständig ist. Außerdem sollte der Reizung der Stäbchen im Großfeld bei mesopischem Niveau Aufmerksamkeit geschenkt werden und darüber hinaus nicht vergessen werden, daß beiden Systemen Primärvalenzen unterschiedlicher physiologischer Bedeutung zugrundeliegen. Die Zunahme des blauen Leuchtdichtebeiwertes um einen Faktor von nahezu fünf bei mesopischer Großfeldbetrachtungsweise hat zur Folge, daß sich der Beitrag der blauen Spektralwertkurve zur Gesamthellempfindlichkeitskurve signifikant erhöht.

Ob dies jedoch als Beweis für einen bereits im Mesopischen eingetretenen Purkinje-Effekt gewertet werden kann, ist angesichts der oben angeführten Vorbehalte bezüglich der Veränderungen von Primärvalenzen und Makulapigmentierung höchst fraglich. Andererseits leisten die Daten der Hypothese Trezonas "von den Stäbchen als blauen Rezeptoren" weiteren Vorschub (s. G.27.). In den Abbildungen 8, 9, 10 u. 11 ist die Spur der Alychne im modifizierten WDW- bzw. CIE-System für den Großfeldbeobachter wiedergegeben. Das 10°-Großfeld-Normvalenz-System ist formal dem 2°-Normvalenz-System ähnlich aufgebaut, insbesondere ist jedoch zu beachten, daß für das 10°-Normvalenz-System keine Möglichkeit besteht, eine Verbindung zu den jetzt gültigen photometrischen Größen herzustellen, wie dies beim 2°-Normvalenzsystem möglich ist. Untersuchungen Kanzows (36) haben gezeigt, daß die von der CIE 1964 (18 a) genormte Spektralwertfunktion $\bar{y}_{10}(\lambda)$ nicht, wie es wünschenswert wäre, mit den Werten der spektralen Hellempfindlichkeit des 10°-Feldes übereinstimmt. Mäder (62) stellte fest, daß die aus seinen experimentell bestimmten Leuchtdichtebeiwerten ermittelte Hellempfindlichkeitsfunktion $V_{10}(\lambda)$ im langwelligen Teil des Spektrums ($\lambda > 490$ nm) recht gut mit $\bar{y}_{10}(\lambda)$ übereinstimmt, im kurzwelligen Bereich sich im Vergleich zu $\bar{y}_{10}(\lambda)$ höhere Werte ergeben. Das hat zur Folge, daß nach den Daten Mäders (62) die Spur der photopischen Alychne eines normalen Trichromaten in der Dar-

stellungsweise des 10°-Normvalenz-Systems nicht mit der x-Achse des CIE Farbtafelkoordinatensystems zusammenfällt, wie dies im 2°-Normvalenz-System von 1931 der Fall ist. In den Abbildungen 10 u. 11 ist die photopische Alychne Mäders (62) (d. h. unter photopischen Bedingungen ermittelte Alychne) gestrichelt eingezeichnet. Der Verlauf der mesopischen Großfeldalychnenspur der Versuchsperson O.M. in der CIE-Farbtafel von 1964 (s. Abb. 11) ist beinah parallel zur photopischen Alychne Mäders.
Die Schnittspur der Alychne der Versuchsperson W.P. weist infolge eines größeren roten Leuchtdichtebeiwertes eine etwas größere Entfernung von der roten Primärvalenz auf. Die Eigenschaft der Beinaheparallelität der photopischen Alychnenspur Mäders und der mesopischen deuteranopischen Alychnenspur der Versuchsperson O.M. bedeutet, daß - bei geeigneter Normierung - sich die relativen Leuchtdichtebeiwerte der beiden Alychnen lediglich in dem Leuchtdichtebeiwert der Primärvalenz $\vec{Y}_{10}$ unterscheiden. Eine mögliche Erklärung dieser ausgezeichneten Lage der deuteranopischen Alychnenspur in der mesopischen Großfeldfarbtafel des CIE-Systems (1964) im Vergleich zur Darstellung der Alychnenspur im 2°-Normvalenz-System könnte einerseits die hinzugetretene Stäbchenaktivierung bieten, andererseits die Änderung der physiologischen Bedeutung der Primärvalenzen im Großfeld leisten. Die Fusionshypothese (s. G.30.) stellt eine weitere Interpretationsmöglichkeit bereit.
Den Stäbchen allein ein solches Phänomen zuzuschreiben, erscheint mir bedenklich. Denn das hieße wohl, den Stäbchen einen ähnlichen Leuchtdichtebeitrag wie den "grünen" Zapfen eines normalen Trichromaten zuzusprechen. Zur Abklärung dieser Fragen müssen noch weitere Versuche unternommen werden.
Betrachtet man die Alychne als Kern einer homomorphen Abbildung (mit den inzwischen bekannten Einschränkungen des Großfeldes), so resultiert aus der Reduktion eines dreidimensionalen Farbenraumes auf einen eindimensionalen Farbenraum eine Helligkeitsskala. Aus den drei trichromatischen mesopischen extrafovealen Spektralwertkurven $\bar{b}_m(\lambda)$, $\bar{g}_m(\lambda)$, $\bar{r}_m(\lambda)$ (s. F.22.) wird eine mesopische spektrale Hellempfindlichkeitskurve $\bar{l}_m$. Das Maximum der Hellempfindlichkeitskurven beider Versuchspersonen stimmt mit dem Maximum der $\bar{w}_{10\,m}(\lambda)$-Kurve überein (s. Abb. 13, 14). Das Maximum der deuteranopischen $\bar{w}_{10\,m}(\lambda)$-Kurve ist eine Variable der Fehlfarbe wie aus der Reduktionsgleichung (Tab. 5) hervorgeht. Die gleiche Beziehung zwischen

dem Maximum der Spektralempfindlichkeitskurve und der langwelligen deuteranopischen Spektralwertkurve fanden auch Kröger-Paulus und Scheibner (48) sowie Scheibner (88) unter fovealen Beobachtungsbedingungen. Beim Kleinfelddeuteranopen wird die Gesamtleuchtdichte in der Hauptsache durch das verbliebene langwellige Pigment Erythrolab getragen (87, 89, 91). Auf den ersten Blick scheint dies auch für den Großfelddeuteranopen zuzutreffen. Eine andere Hypothese wird dem Leser im nächsten Abschnitt vorgestellt. Die Hellempfindlichkeitskurve $\bar{l}_m(\lambda)$ nimmt im Gegensatz zu den bisher aufgetretenen di-und trichromatischen Spektralwertkurven keine negativen Werte an, zeigt einen einfachen Verlauf und kann deshalb als Grundspektralwertkurve angesehen werden.

Der Vergleich spektraler Hellempfindlichkeitsfunktionen setzt gleiche experimentelle Bedingungen voraus. Zu den Wichtigsten gehören: Übereinstimmung in Fixierung, Größe des Testfeldes, Netzhautlokalisation, Leuchtdichte, Adaptationszustand, Größe und Helligkeit des Hintergrundes, Pupillengröße, Beobachtungsgeometrie und Methode. Der unglückliche Umstand, daß ich Fehlfarbe und Quervektor mit einem 10°-zentral fixierten Feld bestimmt habe, andererseits aber Spektralwertkurven eines 2°-Gesichtsfeldes 3 ° 20' parafoveal als Grundlage der 3:1 Reduktion gewählt habe, läßt eine exakte Gegenüberstellung mit den Ergebnissen anderer Autoren nicht ganz ohne Vorbehalte erscheinen. Dennoch folgen Vergleiche mit anderen Autoren, in der Annahme, daß die Ignorierung des Maxwellschen Flecks (s. G.32.) bei der Erstellung von Großfeldspektralwertkurven jene Kurven den Spektralwertkurven peripherer Netzhautareale ähnlich macht. Richards und Luria (82) ermittelten auf einem 2° - großen Gesichtsfeld 3° 20' parafovealer Netzhautreizung die Hellempfindlichkeitskurve normaler Trichromaten auf mesopischem Leuchtdichteniveau ("dim"-Bereich). Bei einer Gegenüberstellung dieser Kurve der an meiner Versuchsperson O.M. ermittelten Hellempfindlichkeitskurve (s. Abb. 19) fällt eine Verschiebung des kurzwelligen Anteils der Richardsschen Kurve um wenige nm zu kürzeren Wellenlängen hin auf. Die Gründe dafür sind meiner Ansicht nach in den verschiedenen Versuchsbedingungen zu suchen, die da sind: Unterschiede in der Leuchtdichte des Experimentierniveaus und in der retinalen Anordnung und Größe der Reizfläche, die gerade die blaue Komponente beim Farbanpassungsvorgang nachdrücklich beeinflussen (82).

Die Hellempfindlichkeit der Fovea bleibt nahezu invariant gegenüber Leuchtdichteänderungen, obwohl extrafoveale Hellempfindlichkeitskurven eine signifikante Verschiebung von der photopischen zur skotopischen Funktion bei Leuchtdichtevariation aufweisen. Diese Ergebnisse Richards' und Lurias (82) stimmen mit den Resultaten früherer Experimente überein, die von Kinney zusammengefaßt sind (38). Der kontinuierliche Übergang von der photopischen zur skotopischen Hellempfindlichkeitskurve bei abnehmender Intensität, wie er auch von Wright 1946 (148), Kokoschka (40), Walters und Wright (140) beschrieben wurde, wahrscheinlich bedingt durch Zunahme des Rhodopsins und einer Stäbchen-Zapfeninteraktion bei Leuchtdichteabfall, beginnt nach experimentellen Befunden Richards' und Lurias (82) erst zwischen der "dim"-und der "dark" - Leuchtdichte-Bedingung ("dark" = 0,1-0,0001 Trol.). Kokoschka (40), der mit einem 9,5°-zentral fixierten Photometerfeld arbeitete, bemerkte ebenfalls nur eine geringe systematische Verschiebung der Hellempfindlichkeitsskala in Richtung kurzer Wellenlängen bei einem Leuchtdichteniveau von etwa 1 cd/m² (=3 Trol) gegenüber der photopischen $V_{9,5}(\lambda)$-Kurve. Das Maximum der mesopischen Hellempfindlichkeitskurven meiner beiden Probanden liegt annähernd bei 555 nm. In Übereinstimmung mit Richards und Luria (82) und Kokoschka (40) hat bei dieser Leuchtdichte noch keine wesentliche Verschiebung zur skotopischen V' (λ)-Kurve stattgefunden. Ein Vergleich meiner ermittelten dichromatischen Hellempfindlichkeitskurven mesopischen Niveaus peripherer Netzhautanteile mit Kröger-Paulus' (49) Ergebnissen photopischer fovealer Betrachtungsweise lenkt, abgesehen von einer geringfügigen systematischen Verschiebung meiner Kurven zu kürzeren Wellenlängen hin (was im übrigen auch bei mesopischer fovealer Betrachtungsweise beobachtet werden kann (40)), die Aufmerksamkeit auf die stärker ausgeprägte blaue Schulter der extrafovealen Hellempfindlichkeitskurven. Die Stabilität parafovealer und fovealer Hellempfindlichkeitskurven bei Leuchtdichtevariation im "dim"- bzw. oberhalb des "dim"-Bereichs (82) lassen schließen, daß die Differenzen dieser Kurven, die aus parafovealer bzw. fovealer Betrachtungsweise hervorgehen, Faktoren zugeschrieben werden müssen, die invariant bleiben gegenüber retinalen Leuchtdichteänderungen. Makulapigmentunterschiede bewirken offenbar diese Effekte. Die abweichende Makulatingierung meiner beiden Versuchspersonen (s. C.32.) schlägt sich dann unmittelbar in der unterschiedlichen

Betonung der kurzwelligen Schulter ihrer spektralen Hellempfindlichkeitsfunktionen nieder (s. Abb. 15, 16).
Kanzow (36) vermutet, daß die Hellempfindlichkeit der Fovea Sehbedingungen beschreibt, die aufgrund ihrer Sonderstellung zur Darstellung der wirksamen Augenempfindlichkeit unglücklich gewählt ist. Seiner Meinung nach verändert sich der Verlauf von $V(\lambda)$ bei einer Vergrößerung des Photometerfeldes sehr bald, um schließlich Werte anzunehmen, die unabhängig von der Größe des Gesichtsfeldes sind. Kokoschka (40) fand heraus, daß der Einfluß der Feldgröße auf die Hellempfindlichkeit vom Spektralbereich abhängig ist. Der Feldgrößeneffekt nehme bei langwelliger Strahlung mit wachsender Wellenlänge zu und sei bei mittleren mesopischen Niveaus am größten; das führe dazu, daß bei größerer Reizfläche die Hellempfindlichkeitskurve im langwelligen Teil niedriger ist; bei kurzwelliger Strahlung sei der Feldgrößeneffekt (blaue Schulter) nahezu niveauunabhängig und quantitativ weitestgehend durch die Makulapigmentierung der Fovea zu erklären. Es sei noch einmal daran erinnert, daß eine Änderung der Feldgröße zu einer neuen Klassenbildung auf der Menge der Farbreize führt, so daß auch die spektrale Hellempfindlichkeitskurve eine Variable der ihr zugrundeliegenden Primärvalenz ist. Durch die vorausgesetzte Unabhängigkeit der $V(\lambda)$- und $V'(\lambda)$-Kurve vom Adaptationsniveau ist die Additivität der entsprechenden photometrischen Größen per definitionem gegeben. Sie sind metrische Größen. Infolge des Zusammenwirkens von Zapfen und Stäbchen ist im Übergangsbereich (mesopisches Sehen) die spektrale Hellempfindlichkeit $V_m(\lambda)$ vom Adaptationsniveau abhängig (40). Eine photometrische Bewertungsgröße im mesopischen Bereich kann daher keine additive Größe sein. Gersun (25) löste das Problem einer adäquaten Strahlungsbewertung durch die Definition einer "äquivalenten Leuchtdichte". Wir können - wie oben bereits erwähnt - sicher sein, daß die spektrale Hellempfindlichkeit im Mesopischen das Ergebnis von Wechselwirkungen zwischen dem Zapfen-und Stäbchensystem ist. Hough und Ruddock (31) verglichen die spektrale Hellempfindlichkeit eines normalen Trichromaten mit der eines Tritanopen. Beide Hellempfindlichkeitskurven unterschieden sich im Photopischen und Skotopischen nur unwesentlich, zeigten aber im Mesopischen ein stark abweichendes Verhalten. Daraus folgert Kokoschka (40) eine unterschiedliche Dominanz der Zapfen-Rezeptoren im mesopischen Leuchtdichtebereich. Auch Walters und Wright (140) stellen bei einem Vergleich der photopischen fovealen Hellempfindlichkeitskurve

mit einer bei hohem Niveau aufgenommenen extrafovealen Intensitätskurve eine beträchtliche Differenz im kurzwelligen Teil der Kurve fest. Auch sie schreiben diese Erscheinung der nach peripher hin abnehmenden Makulapigmentierung zu. Der Wechsel von der skotopischen zur photopischen Sehweise erstreckt sich nach ihren Angaben über eine vergleichsweise schmale Zone von Intensitäten. So ist es wohl zu verstehen, daß sich die mesopischen Hellempfindlichkeitskurven meiner beiden Versuchspersonen nur unbedeutend von der photopischen Kurve hin zur skotopischen Hellempfindlichkeitsfunktion entfernt haben. Für die einzelnen Empfänger erhielt Kokoschka (40) bei abnehmendem Leuchtdichteniveau folgendes Verhalten:

1. Die Stäbchenempfänger werden zunehmend aktiviert
2. Die Rotempfänger werden zunehmend gehemmt
3. Die Grünempfänger werden zunächst aktiviert, um erst bei mittleren mesopischen Niveaus gehemmt zu werden
4. Die Blauempfänger werden noch stärker als die Grünempfänger aktiviert, um erst bei sehr niedrigen Niveaus auszufallen. Ihr absoluter Beitrag zur äquivalenten Leuchtdichte spielt jedoch eine geringe Rolle.

G.30. Fusion oder Ausfall

Die Verarbeitung der einfallenden Strahlung erfolgt nach dem Univarianzprinzip (92,93) in drei getrennt voneinander funktionierenden photoempfindlichen Zapfenpigmenten. Der Quanteneinfang, unabhängig von der Art der Quantenaufnahme, bildet das Substrat der photochemischen Reaktion. Postrezeptoriell, auf neuronaler Ebene, finden Vorgänge statt, die eine Gegenfarbentheorie und eine Fusionstheorie erklären können (63,142). Auch hier erscheint es mir ratsam, Groß- und Kleinfeldverhalten getrennt zu untersuchen. Zunächst einiges zu Vorstellungen über die Ursachen der Kleinfelddeuteranopie. Richards und Luria (83) halten die Ausfallhypothese ebenso wie die Fusionshypothese als Erklärung dieser Farbenfehlsichtigkeit für möglich. In Anlehnung an die Zwei-Typen-Auffassung der Deuteranopie Willmers (144), könnte es ihrer Meinung nach auch zwei Arten von Deutero-Störungen geben. Judd (35) hingegen postuliert das Vorliegen einer Fusion des roten und grünen Mechanismus. Die

densitometrischen Untersuchungen von Rushton (87, 88, 89) ergaben für Deuteranope nur ein Pigment im langwelligen Bereich, nämlich Erythrolab, und für Protanope ebenfalls nur ein Pigment im mittelwelligen Bereich, Chlorolab. Alpern und Pugh (4) weisen ebenfalls auf das Vorhandensein nur eines langwelligen Pigments bei Deuteranopen hin. Die Tatsache, daß in der äußersten Netzhautperipherie der normale Trichromat sich als Monochromat erweist, in Gebieten, die mehr als 30° vom Zentrum der Netzhaut entfernt sind, er dichromatischen Charakter annimmt, obwohl alle drei Zapfenarten dort vertreten sind (146), legt die Vermutung nahe, daß auch die Großfelddichromasie auf eine ähnliche Verschaltungsstörung, nämlich einer Fusion des roten und grünen Mechanismus' auf neuronaler Ebene, zurückzuführen ist. Die im Gegensatz zu Kleinfeldverhältnissen ähnliche Lage der trichromatischen und deuteranopischen Großfeld - (10°) - Alychnen im CIE-Farbenraum von 1964 (s. Abb. 10,11) lassen vermuten, daß nicht nur die Hellempfindlichkeitskurven des normalen Trichromaten und Deuteranopen auf großem Feld ähnlich sind (denn das gilt ja auch für das kleine Beobachtungsfeld), sondern auch der Beitrag der einzelnen Zapfenpigmente zur Gesamtleuchtdichte beider Sehtypen von annähernd gleicher Art ist. Ausfall bei kleiner Reizfläche - Fusion bei großer bzw. peripherer Reizfläche - diese Schlagworte scheinen mir am ehesten die tatsächlichen Verhältnisse wiederzugeben.

G.31. Der Konvergenz-Abgleich

Maxwell (61) hat gesagt, wir müßten danach streben, die allgemeinen Gesetze der Farbkomposition zu entdecken und die Anzahl der Primärvalenzen auf die Kleinstmögliche zu beschränken. Mit dem Problem der kleinsten Anzahl von Referenzfarben sind die speziellen Beobachtungsbedingungen eng verknüpft. Zunächst hängt die Anzahl der Referenzfarben vom Beobachter selbst ab, ob er Tri-, Di- oder gar Monochromat ist. Dann wird sie beeinflußt von der Größe des auf der Netzhaut stimulierten Bezirkes. So ist z. B. ein 10' foveal betrachtetes Photometerfeld für einen normalen Trichromaten dichromatischer (und zwar tritanopischer) Natur (45), obwohl ein 1°-zentral fixiertes Feld den trichromatischen Gesetzmäßigkeiten gehorcht. Ein Gesichtsfeld von 2° Durchmesser wird vielen Situationen nicht gerecht und kann in keiner Weise als typisch für die gesamte Netzhaut angesehen werden. Bei der Großfeldbetrachtungsweise (10°-zentral fixiert) macht der mit Stäbchen ausgestattete Bezirk mehr als 96 % der gesamten aktivierten Netzhautfläche aus (146). Dabei dominiert das extrafoveale Sehen, wenn man das Verhältnis der Fläche eines 10° - und eines 2°-Feldes von 25:1 in Rechnung stellt. Eine Durchsicht der Literatur läßt vermuten, daß Abweichungen von der Additivität eine grundsätzliche Eigentümlichkeit extrafovealen Sehens sind. Das 1964 von der CIE eingeführte farbmetrische 10°-System fand keine weite Verbreitung (17), nicht zuletzt wegen jener Additivitätsabweichungen und der daraus folgenden mangelnden Vorhersagemöglichkeiten. So fand Kelly 1958 (37) unkorrekte Vorhersagen, die bei Anwendung der 10° - Beobachter-Daten auftraten. Moreland und Cruz (1959) (65) und Clarke (1960) (14) berichteten über signifikante Additivitätsdiskrepanzen in Abhängigkeit von der Feldgröße bei der Mischung extrafovealer Reize. Nimeroff (1964) (72), Lozano u. Palmer (1968) (55) und Trezona (134) fanden bemerkenswerte Abweichungen von den Additivitätstheoremen. Das Additivitätskonzept ist von besonderer Wichtigkeit für die technische Farbmetrik und Photometrie. Genau genommen gibt es zwei verschiedene Aspekte der Additivität, die man gewöhnlich als chromatische und photometrische Additivität bezeichnet (46,14). Photometrische Additivität ist dann erfüllt, wenn das Abneysche Gesetz Gültigkeit besitzt. Bei fovealer Betrachtungsweise ist das Additivitätskonzept eine hinreichend

gute Annäherung an eine Basis eines realistischen Systems der Photometrie und Farbmetrik.
Ende des 19. Jahrhunderts erforschten König (44), v. Kries (47) und Tschermak (137) die Eigenschaften parafovealen Sehens. Sie stellten bei Variation der Leuchtdichte einen Zusammenbruch der Farbabgleiche fest. Le Grand und E. Geblewicz (51) fanden 1937 Abweichungen von der photometrischen Additivität bei extrafovealer Großfeldbetrachtungsweise. Clarke's (15) Experimente (1961) demonstrieren Abweichungen sowohl von der chromatischen wie von der photometrischen Additivität bei extrafovealer Reizung auf mesopischem Leuchtdichteniveau. Eine Überprüfung der von Stiles, Burch und Speranskaja (111) aufgestellten 10°-Spektralwertfunktionen betreffs der Additivitätseigenschaften durch Stiles und Wyszecki (125) 1959 zeigt signifikante Diskrepanzen auf, die meist Abweichungen in der Farbart offen legen. Von Kries machte bereits 1896 in seiner Arbeit über die Funktion der Netzhautstäbchen (47) den Stäbchenrezeptor für das Phänomen der Nicht-Additivität verantwortlich. Clarke (14) weist 1960 darauf hin, daß die Stäbcheneinmischung generell nicht notwendigerweise zu Additivitätsabweichungen führen müsse, sondern erst die Existenz einer Zapfen-Stäbchen-Interaktion die allgemeine Form der Nicht-Additivität erklärt. Um die Auswirkung einer Stäbchenreizung auf Farbabgleiche möglichst gering zu halten bzw. zu korrigieren, wurden eine ganze Reihe von Voraussetzungen empfohlen, u. a.:

1. Gebrauch hoher Leuchtdichten
2. Benutzung eines gelben Mischungsreizes statt eines Grünen wegen seiner geringen Stäbchenvalenz (Stiles, 1958 (121))
3. Addition gleicher Beträge von Grün zu jeder Feldhälfte, um das Leuchtdichteniveau anzuheben (Stiles, 1959, (122)).

Bei einem Leuchtdichteniveau oberhalb der Stäbchensättigung halten Stiles und Wyszecki (125) lineare Gesetzmäßigkeiten einer trichromatischen Großfeldfarbmischung ebenso für gültig, wie sie für den fovealen Bereich der Netzhaut längst erwiesen sind. Die Bedingungen einer trichromatischen Großfeldfarbanpassung auf photopischem Niveau lassen sich durch folgendes Gleichungssystem aus-

drücken:

$$(43)\quad \begin{array}{lll} \int \phi_{1,\lambda}\ \bar{a}(\lambda)\ d\lambda & = \int \phi_{2,\lambda}\ \bar{a}(\lambda)\ d\lambda \\ \int \phi_{1,\lambda}\ \bar{b}(\lambda)\ d\lambda & = \int \phi_{2,\lambda}\ \bar{b}(\lambda)\ d\lambda \\ \int \phi_{1,\lambda}\ \bar{c}(\lambda)\ d\lambda & = \int \phi_{2,\lambda}\ \bar{c}(\lambda)\ d\lambda \end{array}$$

wo $\bar{a}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ und $\bar{c}(\lambda)$ unter Stäbchensättigung aufgenommene Grundspektralwertfunktionen sind. $\phi_{1,\lambda}$, $\phi_{2,\lambda}$ sind die entsprechenden Farbreizfunktionen. Ein Großfeld - (10°) - Farbabgleich, der unter Vermeidung einer Stäbchenreizung hergestellt worden ist, bleibt im allgemeinen nicht mehr gültig, wenn Stäbchen in zunehmendem Maße an der Antwort teilhaben. Er bliebe nur dann bestehen, wenn er auch der Gleichung (44) genügen würde:

$$(44)\quad \int \phi_{1,\lambda}\ V'(\lambda)\ d\lambda = \int \phi_{2,\lambda}\ V'(\lambda)\ d\lambda\ ,$$

d. h. wenn in jeder Photometerhälfte die gleiche Stäbchenvalenz anzutreffen wäre. Dies wäre z. B. dann der Fall, wenn $V'(\lambda)$ eine Linearkombination der Spektralwertfunktionen $\bar{a}(\lambda)$ und $\bar{c}(\lambda)$ wäre, was jedoch nicht zutrifft (126). Das Problem der Nicht-Additivität in der großflächigen trichromatischen Farbanpassung hat zu mehreren Vorschlägen einer tetrachromatischen auf Stäbchenvalenzangleichung ausgerichteten Farbanpassung geführt. Kokoschka (40) faßte die Frage nach der tatsächlichen Anzahl der notwendigen Empfänger als Eigenwertproblem auf. Eine daraufhin durchgeführte Faktorenanalyse ergab, daß der Hellempfindlichkeit eines normalen Trichromaten im Mesopischen mindestens drei, wahrscheinlich vier linear unabhängige Basiskomponenten zugrundeliegen.
Bongard, Smirnov und Friedrich (12) versuchten sich 1958 als erste an tetrachromatischen Abgleichen unter Anwendung einer Methode, die sich von "Versuch und Irrtum" leiten ließ. Später, 1970, schlugen Palmer (74 a) und Trezona (131) zwei systematische Methoden tetrachromatischer Farbanpassung vor. Wenn hier die Rede von tetrachromatischen Abgleichen ist, so ist damit nicht etwa ein beliebiger Abgleich mittels vier "Primärvalenzen" gemeint, sondern ein vierdimensionaler Abgleich, der eine Abgleichung der Stäbchenvalenz beider Photometerfelder einschließt. Gleiches soll für den trichromatischen Abgleich der Dichromaten gelten.
Ich formuliere nun eine Zusammenfassung von Thesen über "periphere"

Farbabgleiche, die heute von zahlreichen namhaften Forschern (12,131) geteilt werden.

1. Der "skotopische" Rezeptor funktioniert nicht nur bei niedriger, sondern auch bei hoher Intensität.
2. Der "periphere Farbenraum" des Trichromaten ist nicht drei-, sondern vierdimensional. Dreidimensionale Gleichungen sind nur Annäherungen, aber keine farbmetrischen Gleichungen.
3. Dreidimensionale Gleichungen von Großfeldbeobachtern ändern sich bei Variation der Feldhelligkeit und des Adaptationszustandes. (Permanenz der Farbgleichungen ist aufgehoben)
4. Vierdimensionale Gleichungen sind stabil (d. h. invariant gegenüber Leuchtdichteänderungen, Permanenz und Persistenz sind gewahrt).
5. Für praktische Zwecke reicht die Anwendung dreier Spektralwertfunktionen aus

Der trichromatische Großfeldabgleich des normalen Trichromaten ist weder schwer durchführbar noch unpräzise, trotzdem liegt ein verzerrter Abgleich vor. Der Grund dafür, warum er überhaupt möglich ist, obschon die Anzahl der absorbierenden Pigmente vier beträgt, besteht nach Trezonas(132) Ansicht in dem Vorhandensein nur dreier die Signale fortleitenden Kanäle. Der vierdimensionale Konvergenz-Abgleich ist nach ihren Angaben mehr als nur ein Farbabgleich; er ist eine "physiologische Identität", ein Ausdruck, der zuerst von Clarke 1960 (14) benutzt wurde. Solch ein Abgleich nimmt gleiche Quantenabsorption in jedem der vier Pigmente auf beiden Hälften des Gesichtsfeldes für sich in Anspruch (132). In Analogie dazu ist für einen Dichromaten ein trichromatischer Konvergenz-Abgleich, für einen Zapfenmonochromaten ein dichromatischer Konvergenz-Abgleich eine "physiologische Identität" auf dem Rezeptorniveau. Ein mesopischer dichromatischer Großfeldabgleich bedeutet hingegen "physiologische Identität" auf dem retinogeniculärem Niveau (Modifikation des Müllerschen Satzes von der Sinnesenergie (66)). Die von Trezona (134) eingeführte vierdimensionale Abgleichsmethode hält nach ihren eigenen Angaben den

linearen Gesetzen des vierdimensionalen Raumes stand (135,136). Diese Ausführungen Trezonas legen die Vermutung nahe, daß auch im dreidimensionalen Konvergenzraum eines Deuteranopen Eindeutigkeit des Konvergenz-Abgleiches, Additivität, Permanenz der Farbgleichungen und Invarianz gegenüber dem Adaptationszustand und wahrscheinlich auch der Feldgröße gewährleistet sind. 1971 stellte Palmer (74 b) fest, daß dreidimensionale Abgleiche (im Sinne des Konvergenz-Abgleichs) seiner deuteranopischen Versuchspersonen die Permanenz der Farbgleichungen nicht erfüllten.
Die Ergebnisse meiner beiden Versuchspersonen sind ein Beweis für die Existenz trichromatischer Konvergenz-Abgleiche "kompletter" (s. G.26.) Deuteranopen bei Großfeldbetrachtung. Die Präzision des Konvergenz-Abgleiches wird von der Genauigkeit des skotopischen Helligkeitsabgleiches bestimmt. Dieser steht dem photopischen Farbabgleich natürlich weit an Genauigkeit nach. Eine Variation des grünen Farbwertes E am DFM um ca. fünf Einheiten beim Abgleich auf skotopischem Niveau konnte visuell nicht wahrgenommen werden.
Die interindividuelle Streuung der Konvergenz-Abgleiche beider Probanden ist beträchtlich (s. Abb. 20,21). Drei Ursachen mache ich hauptsächlich dafür verantwortlich:

1. die unterschiedliche Konzentrationsfähigkeit beider Versuchspersonen, die auf die erhebliche Altersdifferenz zurückgeführt werden kann
2. die unpräzise Helligkeitsanpassung auf skotopischem Niveau
3. und die unterschiedlich ausgeprägte Makulapigmentierung.

Weil O.M. über ein dichteres Makulapigment verfügte, besaßen seine photopischen Abgleiche durch Einstellung eines relativ großen blauen Farbwertes in der Regel eine größere Stäbchenvalenz als die von W.P. Der grüne Farbwert mußte als Ausgleich dafür auf skotopischem Niveau entsprechend kleiner einreguliert werden. Deshalb, so glaube ich, sind die Konvergenzpunkte der Versuchsperson O.M. im mittleren Bereich der Farbtafel näher an die Purpurseite des Farbendreiecks herangerückt als die Vergleichspunkte von W.P.. Die Tatsache, daß der Konvergenzpunkt in allen Fällen unterhalb des Ausgangsreizes in der B, G, R-Farbtafel liegt, ist der anfangs größeren Stäbchenvalenz des Mischfeldes zu verdanken. Vielleicht

wird dieser Effekt bis zu einem gewissen Grade auch von der nicht ganz neutralen Abschwächung des Mischungsstrahlenganges (durch ein Graufilter der optischen Dichte eins) getragen.
Der Konvergenz-Abgleich selbst ist unabhängig von den ihm vorausgegangenen alternierenden Abgleichen, jeder Abgleich auf dem Wege dorthin beeinflußt jedoch den Nachfolgenden. Wie die Abbildungen 24.1-10 zeigen, reichen meist 7 - 12 Schritte aus, um zum Konvergenz-Abgleich zu gelangen. 15 - 25 Minuten nahmen je nach Trainingszustand der Probanden die einzelnen Konvergenz-Abgleiche in Anspruch. Die von Trezona (134) geforderte Invarianz des Konvergenz-Abgleiches gegenüber der Feldgröße fand als zufälliges Ergebnis eine Bestätigung meiner beiden deuteranopischen Versuchspersonen beim Wechsel der Gesichtsfeldgröße von 10° auf 2° Photometerfelddurchmesser.

.32. Der Maxwellsche Fleck

1955 betonte Stiles, daß zu den vielfältigen Problemen der Großfeldfarbmischung auch eine zentrale Ungleichheit des Photometerfeldes gehört (120). Aus diesem Grunde wies er seine Versuchspersonen an, diese zentrale Ungleichheit zu ignorieren; Speranskaya (111) blendete diesen Anteil des Gesichtsfeldes aus dem Strahlengang aus. Jener zentrale inhomogene Fleck, in der Literatur allegemein als "Maxwellscher Fleck" bezeichnet, wird nicht von allen Beobachtern in gleichem Maße wahrgenommen, einige sehen ihn gar nicht.
Palmer (75) behauptet, daß auch der vierdimensionale Konvergenzfarbenraum des Trichromaten nicht linear ist. Schuld daran ist seiner Meinung nach der Maxwellsche Fleck.
Die übliche Erklärung des Maxwellschen Fleckes ist die Änderung der Makulatingierung vom Zentrum zur Peripherie der Netzhaut hin. Trezona (131) nimmt hier eine Sonderstellung ein. Ihrer Idee folgend, daß Stäbchen und blaue Zapfen selbständig bestehen, sich aber an einer Nervenbahn beteiligen, glaubt sie, die durch Stäbchenreizung blaue Eigenschaft der Peripherie lasse das Zentrum des Photometerfeldes durch die Wirkung des Simultankontrastes gelb erscheinen. Wald (138) gab 1945 bekannt, das Makulapigment isoliert zu haben, maß seine Absorptionskurve und identifizierte es als "Xanthophyll". 1963 nahm Ruddock (86) eine visuelle Messung der Absorptionskurve des Makulapigmentes vor und kam zu dem Schluß,

daß es sich nicht um das von Wald isolierte Pigment Xanthophyll handeln könne. Auch eine meiner beiden Versuchspersonen, W.P., gab vor, daß ihn beim Farbabgleich blaugrüner Farbreize - speziell der Trendelenburggleichung- ein zentral andersfarbiger Fleck störe. Um dennoch einen Abgleich erzielen zu können, trug ich ihm auf, jenen Fleck nicht zu beachten. Die Ursache dafür, daß nur W.P. den Maxwellschen Fleck sah, nicht jedoch O.M., sehe ich in der unterschiedlich starken Abnahme des Pigmentes von zentral nach peripher. Bei O.M. ist die Änderung des Pigmentes mit Zunahme der Feldgröße weniger stark ausgeprägt, wie aus dem Verhältnis des blauen und grünen Farbwertes bei Einstellung der Trendelenburggleichung auf großem bzw. kleinem Gesichtsfeld hervorgeht. Für O.M. ergab sich:

E/D = 0,4869 auf kleinem Feld (2°)
und E/D = 0,7608 auf großem Feld (10°)

Für W.P. sahen die entsprechenden Verhältnisse wie folgt aus:

E/D = 0,4950 auf kleinem Feld (2°)
und E/D = 0,9100 auf großem Feld (10°)

Beim Konvergenz-Abgleich jener Farbreize traten die störenden Einflüsse des Maxwell-Fleckes nicht auf, ganz so wie es Trezona bei ihren tetrachromatischen Konvergenz-Abgleichen vorfand (132).

H. Zusammenfassung

1. Die Fehlfarbenbestimmung auf kleinem Reizfeld bei mesopischem Leuchtdichteniveau ergab im Vergleich zu Kröger-Paulus' und Scheibners Ergebnissen auf photopischem Leuchtdichteniveau unter sonst gleichen Bedingungen bei beiden deuteranopischen Versuchspersonen in der Farbtafel eine Annäherung des Fehlpunktes an den Farbort der grünen Primärvalenz, d. h. eine Verschiebung von λ_{max} der $\bar{w}(\lambda)$-Kurve gegen größere Wellenlängen (G.28.a. (48)).

2. Die auf kleinem Feld diagnostizierten Deuteranopen O.M. und W.P. zeigten auch bei mesopischer Großfeldbeobachtung reines deuteranopisches Verhalten (E.16, G.26.). Es handelt sich also im Sinne Jägers und Krokers um "komplette" Deuteranope (G.26.).

3. In Anlehnung an Punkt 2. existierte bei mesopischer Großfeldbetrachtungsweise natürlich auch eine deuteranopische Großfeldfehlfarbe. Diese hatte die Besonderheit (im Gegensatz zu den Kleinfeldfehlfarben), im B_{10}, G_{10}, R_{10}-System eine negative blaue Komponente aufzuweisen. Ein interindividueller Vergleich lehrt, daß die Großfeldfehlfarben von O.M. und W.P. nicht auf eine gemeinsame Grundgesamtheit zurückgehen. Alperns Cluster-Hypothese stellt eine mögliche Erklärung dieses Sachverhaltes dar.
   Die Fehlfarben dienten als Kern einer homomorphen Abbildung eines dreidimensionalen auf einen zweidimensionalen Farbenraum. Mit Hilfe dieses Homomorphismus wurden aus drei mesopischen Spektralwertkurven zwei mesopische deuteranopische Spektralwertkurven errechnet.

4. Die Reduktion eines dreidimensionalen "mesopischen Farbenraumes" auf einen eindimensionalen mesopischen Helligkeitsraum gelang mit Hilfe einer "mesopischen Großfeldalychne". Das Ergebnis war eine spektrale Hellempfindlichkeitskurve der Deuteranopen. Diese Kurve zeigte keine deutliche Verschiebung in Richtung auf die skotopische Hellempfindlichkeitskurve, aber die Ausprägung

einer blauen Schulter. Diese Eigenart ist mit großer Wahrscheinlichkeit an die zur Peripherie hin abnehmende Makulatingierung gebunden. Das Ausmaß der Betonung der kurzwelligen Schulter läßt offensichtlich auch Rückschlüsse auf die individuelle Makulapigmentierung zu. Eine wirkungsvolle Stäbchenaktivierung ist bei dem gewählten Leuchtdichteniveau noch nicht eingetreten.

5. Das von Trezona für Trichromaten entwickelte tetrachromatische konvergierende Abgleichsverfahren ist als trichromatischer Konvergenz-Abgleich auf deuteranopische Verhältnisse übertragbar. Der dreidimensionale Konvergenz-Abgleich von Deuteranopen ist leicht durchführbar und offenbar unabhängig von den Ausgangsbedingungen. Er führt zu einem dreidimensionalen "Konvergenz-Raum" mit wahrscheinlich linearer Metrik. Verschiedenen Farbreizen, deren Farbörter auf einer deuteranopischen Verwechslungsgeraden liegen und nicht identisch sind, entsprechen in der Regel verschiedene Konvergenz-Abgleiche. Der Maxwellsche Fleck wurde beim Konvergenz-Abgleich nicht wahrgenommen. Der Konvergenz-Abgleich besaß auf kleinem und großem Feld Gültigkeit.

I. Schrifttum

(1) AITKEN, J., On colour and colour sensations. Trans. Roy. Soc. Arts. 8 (1872), S. 375-418

(2) AGUILAR, M. u. W.S. STILES, Saturation of the rod mechanism of the retina at high levels of stimulation. Optica Acta 1 (1954), S. 59-65

(3) ALPERN, M. u. T. WAKE, Cone pigments in human deutan colour vision defects. J. Physiol. 266 (1977), S. 595-612

(4) ALPERN, M. u. E.N. PUGH, Variation in the action spectrum of Erythrolabe among deuteranopes. J. Physiol. 266 (1977), S. 613-646

(5) ALPERN, M. u. J. MOELLER, The red and green cone visual pigments of deuteranomalous trichromacy. J. Physiol. 266 (1977), S. 647-675

(6) BECK, H. u. M. RICHTER, Neukonstruktion des Dreifarbenmeß-gerätes nach Guild-Bechstein, Farbe 7 (1958), S. 141-152

(7) v.d. BERG, T.J.T.P. u. H. SPEKREIJSE, A temporal analogue of MacAdam Ellipses description of rod -cone interaction. Vision Research (1980), S. 767-770

(8) BLACKWELL, H.R. u. O.M. BLACKWELL, Rod and cone receptor mechanism in typical and atypical congenital achromatopsia. Vis. Res. 1 (1961), S. 62-107

(9) BLOTTIAU, F., Les défauts d'additivité de la colorimétrie trichromatique.Rev. d. 'Opt. 26 (1947), S. 193

(10) BOYNTON, R.M., M. IKEDA u. W.S. STILES, Interactions among chromatic mechanisms as inferred from positive and negative increment thresholds. Vis. Res. 4 (1964), S. 87-117

(11) BOYNTON, R.M. u. H. SCHEIBNER, On the perception of red by "red blind" observers. Acta Chromatica 1 (1967), S. 205-220

(12) BONGARD, M.M., M.S. SMIRNOV u. L. FRIEDRICH, The four-dimensional colour space of the extrafoveal retinal area of the human eye. Visual Problems of Colour 1, NPL Symposium No.8 H.M. Stationery Office, London (1958), S. 325-330

(13) BROWN, P.K. u. G. WALD, Visual pigments in single rods and cones of the human retina, Science N.Y. 144 (1964), S.45-52

(14) CLARKE, F.J.J., Extra-foveal colour-metrics. Optica Acta 7 (1960), S. 355-384

(15) CLARKE, F.J.J., Extra-foveal vision and the additivity concept. Farbe 11 (1962) Nr. 1/6

(16) CLARKE, F.J.J., Futher studies of extra-foveal colour metrics. Optica Acta 10 (1963), S. 257-284

(17) CLARKE, F.J.J. u. P.W. TREZONA, Towards general systems of colorimetry and photometry based on the tetrachromatik colour match, Publication CIE No. 36 (1976), Bureau Central de la CIE, Paris

(18) DEUTSCHE NORMEN. a) DIN 5033 "Farbmessung" (1979 ff.); b) DIN 5031, Blatt 2 "Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik" (1967ff.); c) DIN 5031, Blatt 6 "Pupillen-Lichtstärke" als Maß für die Netzhautbeleuchtung (1975 ff.)

(19) EBBINGHAUS, H., Theorie des Farbensehens. Z. Psychol. Physiol. Sinnesorg. 5 (1893), S. 145-238

(20) FACHNORMENAUSSCHUSS Farbe (FNF), Anweisung für die Untersuchung des Farbensehens mit dem Anomaloskop nach Nagel. Farbe 6 (1957), S. 115-119

(21) FICK, A., Zur Theorie der Farbenblindheit, Phys.-med.Verl., Würzb. 5 (1874), S. 158-162

(22) FISCHER, G., Lineare Algebra. Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg (1975), S. 99 ff.

(23) FRUMKES, T.E., M.D. SEKULER, M.C. BARRIS, E.H. REISS u. L.M. CHALUPA, Rod-cone interaction in human scotopic vision. Vis. Res. 13 (1973), S. 1269-1282

(24) FROME, E., T. PIANTANIDA u. D.H. KELLY, Flicker thresholds reveal forbidden cones in dichromats. Invest. Ophthalmol. Visual Sci., Suppl. 17 (1978), S. 197

(25) GERSUN, A., Visuelle Photometrie im Bereich niedriger Leuchtdichte. Russ., Doklady Akad. Nauk SSSR 27 (1942), Nr. 4

(26) GORDON, J. u. I. ABRAMOV, Colour vision in the peripheral retina II. Hue and saturation. J. Opt. Soc. Am. 67 (1977), S. 202-206

(27) GRÜTZNER, H.P., Der Lichtverlust in der Macula lutea und die Einstellung von Farbgleichungen auf kleinem und großem Gesichtsfeld. Dissertation Tübingen 1955

(28) GUILD, J., The colorimetric properties of the spectrum. Philos. Trans. Roy. Soc. London A 230 (1931), S. 149-187

(29) v. HELMHOLTZ, H., Handbuch der physiologischen Optik. 2. Aufl. Hamburg/Leipzig: Voss 1896

(30) HERING, E., Zur Lehre vom Lichtsinn. Wien: Karl Geralds Sohn (1978), Berlin: J. Springer (1918)

(31) HOUGH E.A. u. K.H. RUDDOCK, The parafoveal visual response of a tritanope and an interpretation of the V (λ) sensitivity functions of mesopic vision. Vis. Res. 9 (1969), S. 935-946

(32) HOUGH, E.A., The Purkinje Shift. Vis. Res. 9 (1969), S. 313-315

(33) JAEGER, W. u. K. KROKER, Über das Verhalten der Protanopen und Deuteranopen bei großen Reizflächen. Klin. MBL. Augenheilk. 121 (1952), S. 445-449

(34) JARCZYK, N., Ein Beitrag zur Theorie des Farbensehens. Farbe 17 (1968), S. 285-299

(35) JUDD, O.B., Standard response functions for protanopic and deuteranopic vision. J. opt. Soc. Amer. 35 (1945), S. 199-221

(36) KANZOW, J., Bestimmung der relativen spektralen Hellempfindlichkeit für das 10°-Gesichtsfeld. Farbe 13 (1964), S. 143-155

(37) KELLY, K.L., Observer differences in colour-mixture functions studied by mean of a pair of metameric grays. J. Res. Nat. Bur. Stand. 60 (1958), S. 97-103

(38) KINNEY, J.A.S., Comparison of scotopic, mesopic and photopic spectral sensitivity curves. J. opt. Soc. Amer. 48 (1958), S. 185-190

(39) KINNEY, J.A.S., Sensitivity of the eye to spectral radiation at scotopic and mesopic intensity levels. J. opt. Soc. Amer. 45 (1955), S. 507-514

(40) KOKOSCHKA, S., Untersuchungen zur mesopischen Strahlungsbewertung. Farbe 21 (1972), S. 39-112

(41) KOLLEGIUM BIOMATHEMATIK NW, Biomathematik für Mediziner. HTB 2. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag 1976

(42) KOWALSKY, H.J., Lineare Algebra. Berlin, New York: Walter de Gruyter 1972,

(43) KÖNIG, A., Über den menschlichen Sehpurpur und seine Bedeutung für das Sehen. S.B. Berlin Akad. Wiss. 1894, S. 577

(44) KÖNIG, A., Die Abhängigkeit der Farben und Helligkeitsgleichungen von der absoluten Intensität. S.B. Akad. Wiss. Berlin 1897, S. 871-882

(45) KÖNIG, A., Gesammelte Abhandlungen zur physiologischen Optik. Hrg. v. Th. Engelmann, Leipzig: J.A. Barth 1903

(46) KÖNIG, H., Der Begriff der Helligkeit. Editions du Griffon, Neuchatel 1947

(47) KRIES, J.v., Über die Funktion der Netzhautstäbchen. Z. Psychol. Physiol. Sinnesorg. 9 (1896), S. 81-123

(48) KRÖGER-PAULUS, A. u. H. SCHEIBNER, Variation of deuteranopic blind fundamentals and the visual cone pigment erythrolab. Ophthalmic Research 12 (1980), S. 177-183

(49) KRÖGER-PAULUS, A., Reduktion der Deuteranopie aus der normalen Trichromasie. Farbe 28 (1980), S. 73-116

(50) LANG, H., Farbmetrik und Farbfernsehen. München, Wien: R. Oldenbourg Verlag 1978

(51) LE GRAND, Y.u.E. GERLEWICZ , La dualité de la vision aux brillance élevées. Ann. Psychol. 38 (1937), S. 1

(52) LE GRAND, Y., Light, Colour and Vision. Chapmann and Hall, London 1957

(53) LEBER, Th., Über die Theorie der Farbenblindheit und über die Art und Weise wie gewisse, der Untersuchung von Farbenblinden entnommene Einwände gegen die Young-Helmholtzsche Theorie sich mit derselben vereinigen lassen. Klin. Mbl. Augenheilkunde 11 S. 467-473

(54) LINGENBERG, R., Lineare Algebra. B.I. Hochschultaschenbücher Bd. 828 Mannheim 1969

(55) LOZANO, R.D. u. D.A. PALMER, Large-field colour matching and adaptation. J. Opt. Soc. Am. 58 (1968), S. 1653-1956

(56) LYTHGOE, R., Dark-adaptation and the peripheral colour sensations of normal subjects. Br. J. Ophthal. 15 (1931), S. 193-210

(57) MACLEOD, D.I.A. u. P. LENNIE, Red-green blindness confined to one eye. Vision Research 16 (1976), S. 691-702

(58) MAKOUS, W. u. R. BOOTHE, Cones block signals from rods. Vis. Res. 14 (1974), S. 285-294

(59) MARKS, W.B., Dobelle, W.H. u. E.F. MACNICHOL, Visual pigments of single primates cones. Science 143 (1964), S. 1181-1182

(60) MAXWELL, J.C., Experiments on colour as perceived by the eye with remarks on colour blindness.
Trans. Roy. Soc. Edinburgh 21 (1855/57), S. 275-297

(61) MAXWELL, J.C., On the theory of compand colours and the relations of the colours of the spektrum. Phil. Trans. R. Soc. 150 (1860), S. 57-84

(62) MÄDER, K., Flimmerphotometrische Bestimmung der Leuchtdichte-beiwerte für den 10°-Beobachter. Farbe 19 (1970), S. 311-318

(63) MOLLON, J.D., Post-receptoral processes in colour vision. Nature 283 (1980), S. 623-624

(64) MOON, P. U. D.E. SPENCER, On the Stiles-Crawford effect. J. opt. Soc. Amer. 34 (1944), S. 319-329

(65) MORELAND, J.D. u. A. CRUZ, Colour perception with the peripheral retina. Optica Acta 6 (1959), S. 117-151

(66) MÜLLER, J., Über die phantastischen Gesichtserscheinungen. Koblenz 1826

(67) NAGEL, W.A., Dichromatische Fovea, Trichromatische Peripherie. Z. Sinnesphysiologie 39 (1905), S. 93-101

(68) NAGEL, W.A., Neue Erfahrungen über das Farbensehen der Dichromaten auf großem Felde. Z. Sinnesphysiologie 41 (1907), S. 319-337

(69) NAGY, A.L., Large-field substitution Rayleigh matches of dichromats. J. opt. Soc. Am. 70 (1980), S. 778-784

(70) NAGY, A.L. u. M. BOYNTON, Large-field colour naming of dichromats with rods bleached. J. opt. Soc. Am. 69 (1979), S. 1259-1265

(71) NEWTON, I., Optics. 4.ed. Innys. (zitiert nach (108)). London 1730

(72) NIMEROFF, J., Colorimetry in parafoveal fields -II. Additivity failure. J. opt. Soc. Am. 54 (1964), S. 833-838

(73) NYBERG, N.D. u. E.N. YUSTOVA, Researches on dichromatic vision and the spectral sensitivity of the receptors of trichromats. In: Visual problems of colour. Symposium No. 8. London HMS 1958 Bd. 2, S. 475-486

(74a) PALMER, D.A., Colour matches, which include equality of scotopic luminance. Tag.-Ber. Intern. A.I.C. Farbtagung "Colour 69" Stockholm 1969, Musterschmidt 1970, S. 166-171

(74b) PALMER, D.A., Tetrachromatic Matches, Department of Physiological Optics. Institute of Ophthalmology, London (1971), S. 828-830

(75) Palmer, D.A., Non additivity in color matches with four instrumental Stimuli. J. opt. Soc. Am. 71 (1981), S. 966-969

(76) PAULUS, W., Fehlfarben und Alychnen von Protanopen und Protanomalen und ihre Bedeutung für das Farbensehen des normalen Trichromaten. Farbe 27 (1978/79), S. 59 - 127

(77) PESCHEL, E., Analytische Geometrie und lineare Algebra. Bibliographisches Institut Mannheim/Wien/Zürich, Bd. 15/15a (1970), S. 150 f.

(78) PIANTANIDA, T., F. Frome u. D.H. KELLY, Spectral sensitivity of the forbidden cones in dichromats. Invest. Ophthalmol. Visual Sci. Suppl. 17 (1978), S. 197-198

(79) PITT, F.H.G., Characteristics of dichromatic vision. Med. Res. Council Rep. of the Com. upon the Physiol. of Vision, XIV. Special Report, Series 200, London 1935

(80) PURKINJE, J., Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. Teil 1: Prag 1823, Teil 2: Berlin 1825

(81) REEB, O., Grundlagen der Photometrie. Karlsruhe: Braun 1962

(82) RICHARDS, W. u. S.M. LURIA, Color-mixture functions at low luminance levels. Vis. Res. 4 (1964), S. 281-313

(83) RICHARDS, W. u. S.M. LURIA, Recovery and spectral sensitivity curves for colour-anomalous observers. Vis. Res. 8 (1968), S. 929-938

(84) RICHTER, M., Einführung in Farbmetrik. Berlin-New York, W. de Gruyter, Sammlung Göschen, 1976

(85) RUDDOCK, K.H., Parafoveal colour vision responses of four dichromats. Vis. Res. 11 (1971), S. 143-156

(86) RUDDOCK, K.H., Evidence for macular pigmentation from colour matching data. Vis. Res. 3 (1963), S. 417-429

(87) RUSHTON, W.A.H. u. H.D. BAKER, Red/green sensitivity in normal vision. Vis. Res. 4 (1964), S. 75-85

(88) RUSHTON, W.A.H.,D.S. POWELL u. K.D. WHITE, The spectral sensitivity of "red" and "green" cones in the normal eye. Vis. Res. 13 (1973), S. 2003-2015

(89) RUSHTON, W.A.H., A foveal pigment in the deuteranope. J. Phys. 176 (1965), S. 24-37

(90) RUSHTON, W.A.H., The discussion on human colour vision. Little Brown, Boston 1965, S. 246-247

(91) RUSHTON, W.A.H., Cone pigment kinetics in the deuteranope. J. Phys. 176 (1965), S. 38-45

(92) RUSHTON, W.A.H., Visual pigments in man. Scientific American 207 (1962), S. 120-132

(93) RUSHTON, W.A.H., Colour blindness and cone pigments. Am. J. Optom. Physiol. Opt. 41 (1964), S. 265-281

(94) SCHEIBNER, H., Über Farben und ihre Metrik. Lichttechnik 16 (1964), S. 497-498

(95) SCHEIBNER, H., Trichromasie, Dichromasie, Monochromasie. Optica Acta 15 (1968), S. 329-338

(96) SCHEIBNER, H., Dichromasie als Homomorphismus der Trichromasie. Optica Acta 15 (1968), S. 339-349

(97) SCHEIBNER, H., Zum Verhältnis der Photometrie zur Farbmetrik. Lichttechnik 21 (1969), S. 107-A- - 110 A

(98) SCHEIBNER, H., Über die Begriffe Farbvalenz, Farbart und Chrominanz in der Farbmetrik. Farbe 18 (1969), S. 221-232

(99) SCHEIBNER, H., Chrominanz u. Farbart beim Farbfernsehen. Optica Acta 17 (1970), S. 144

(100) SCHEIBNER, H., Missing colours (Fehlfarben) of deuteranopes and extreme deuteranomalous observers. In: Colour Vision Deficiencies III (Hrsg. v.G.Verriest) (=Modern Problems in Ophthalmology Bd. 17), Basel: Karger 1976, S. 21-26

(101) SCHEIBNER, H. u. O. LUDWIG, Bestimmung der Fehlfarben von Deuteranopen und extremen Deuteranomalen. In Vorber.

(102) SCHEIBNER, H. u. N. BOLL, Bestimmung der Alychne von Deuteranopen und extremen Deuteranomalen. In Vorber.

(103) SCHEIBNER, H. u. R.M. BOYNTON, Residual red-green discrimination in dichromats. J. opt. Soc. Am. 58 (1968), S. 1151-1158

(104) SCHOBER, H., Das Sehen. Leipzig, Fachbuch-Verl. Bd. II (1957/58), S. 207

(105) SCHRÖDINGER, E., Grundlinien einer Theorie der Farbmetrik im Tagessehen. Ann. Physik (IV) 63 (1920), S. 397-456 u. 481-520

(106) SCHULTZE, M., Zur Anatomie und Physiologie der Retina. Arch. Mikr. Anat. 2 (1866), S. 176-286

(107) SAID, F.S. u. R.A. WEALE, The variation with age of the spectral transmissivity of the living human crystalline lens. Gerontologia 3 (1959), S. 213-231

(108) SAUGSTAD, P. u. A. SAUGSTAD, The duplicity theory. An Evaluation. Advances in Ophthalmology, Vol. IX., Basel: Karger 1959, S. 1-51

(109) SMITH, V.C. u. J. POKORNY, Large field trichromacy in protanopes and deuteranopes. J. opt. Soc. Am. 67 (1977), S. 213-220

(110) SMITH, V.C. u. J. POKORNY, Effect of field-size on red-green colour mixture equations. J. opt. Soc. Am. 66 (1976), S. 705-708

(111) SPERANSKAJA, N.I., Determination of spectrum colour coordinates for twenty-seven normal observers. Optics and Spectroscopy 7 (1959), S. 424-428

(112) SPERNER, E., Einführung in die analytische Geometrie und Algebra 2. Teil, Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen (1963)

(113) STABELL, U. u. B. STABELL, Night vision as chromatic vision. Scand. J. Psychol. 8 (1967), S. 145-149

(114) STABELL, U. u. B. STABELL, Chromatic rod activity at mesopic intensities. Vis. Res. 13 (1973), S. 2255-2260

(115) STABELL, U. u. B. STABELL, The effect of rod activity on colour matching functions. Vis. Res. 15 (1975), S. 1119-1123

(116) STABELL, U. u. B. STABELL, Rod and cone contributions to peripheral colour vision. Vis. Res. 16 (1976), S. 1099-1104

(117) STABELL, U. u. B. STABELL, Effects of rod activity on colour threshold. Vis. Res. 16 (1976), S. 1105-1110

(118) STABELL, U. u. B. STABELL, Rod and cone contributions to change in hue with eccentricity. Vis. Res. 19 (1979), S. 1121-1125

(119) STABELL, U. u. B. STABELL, Change in hue with rod intrusion during dark-adaptation. Vis. Res. 19 (1979), S. 1127-1131

(120) STILES, W.S. u. G. WYSZECKI, The basic data of colour-matching. Phys. Soc. London Yearbook (1955), S. 44-65

(121) STILES, W.S., The average colour matching functions for a large matching field. Visual Problems of Colour 1, NPL Symposium No. 8. H.M. Stationery Office London (1958), S. 211-247

(122) STILES, W.S., Colour vision; the approach through increment-threshold sensitivity. Proc. Nat. Acad. Sci. 45 (1959), S. 100-134

(123) STILES, W.S. u. B.H. CRAWFORD, The luminous efficiency of rays entering the eye pupil at different points. Proc. Roy. Soc. London B 112 (1933), S. 428-450

(124) STILES, W.S. u. J.M. BURCH, NPL Colour-matching investigation. Final report (1958), Optica Acta 6 (1959), S. 1-26

(125) STILES, W.S. u. G. WYSZECKI, Second N.R.C. progress report on field trials (Donaldson Colorimeter) of colour-matching functions. Report No. A P OI 908, Ottawa 1959 (zit. nach (126))

(126) STILES, W.S. u. G. WYSZECKI, Rod intrusion in large-field colour matching. Acta chromatica 2 (1973), S. 155-163

(127) STÖCKER, H., Psychophysische Untersuchungen zur Charakterisierung der Deuteranomalie durch die beiden langwelligen Zapfenpigmente. Dissertation Düsseldorf 1980

(128) STÖCKER, H., E. WOLF u. H. SCHEIBNER, Erythrolab und Deuteranomalie. 76. Zus. Dtsch. Ophthalm. Ges. (1979), S. 409-414

(129) THOMA, W. u. H. SCHEIBNER, Tritanopic Saturation and borderline distinctivity. Docum. Ophthal. Proc. Series, Vol. 33, ed. by Verriest, 1982, S. 19-27

(130) TREZONA, P.W., Additivity of colour equations II. Proc. Phys. Soc. B 67 (1954), S. 513-522

(131) TREZONA, P.W., Rod participation in the blue machanism and its effect on colour matching. Vis. Res. 10 (1970), S. 317-332

(132) TREZONA, P.W., The tetrachromatic colour match as a colorimetric technique. Vis. Res. 13 (1973), S. 9-25

(133) TREZONA, P.W., Additivity in the tetrachromatic colour-matching system. Vis. Res. 14 (1974), S. 1291-1303

(134) TREZONA, P.W., Aspects of peripheral colour vision. In: Colour Vision deficiencies III. (Hrsg. v. G. Verriest) In: Mod. Probl. Ophthal. 17 (1976), S. 52-70

(135) TREZONA, P.W., Color Res. and Application 1 (1976), S. 95-101

(136) TREZONA, P.W., AIC Color 81, Berlin

(137a) TSCHERMAK, A., Über die Bedeutung der Lichtstärke und des Zustandes des Sehorgans für farblose optische Gleichungen. Pflügers Arch. ges. Physiol. 70 (1898), S. 279-328

(137b) VOS, J.J.,Literature review of human macular absorption in the visible and ist concequences for the cone recptor primaries. Inst. Percept. RVO-TNO Report 12F 1972-17, Soesterberg (1972)

(138) WALD, G., Human vision and the spectrum. Science 101 (1945), S. 653-658

(139) WALD, G., Analysis of retinal function by a two-filter method. J. opt. Soc. Americ. 50 (1960), S. 633-641

(140) WALTERS, H.V. u. W.D. Wright, The spectral sensitivity of the fovea and extrafovea in the Purkinje-range. Proc. Roy. Soc. London B 131 (1943), S. 340-361

(141) WEHNER, R., Farben, Farbrezeptoren und Farbempfindungen - zum heutigen Stand der Neurophysiologie des Farbensehens. Universitas 29 (1974), S. 187-194

(142) WIENRICH, M. u. E. ZRENNER, Chromatic signals in retinal ganglion cells: cat versus monkey, Pflügers Archiv 389 (1981) Supplement R 29

(143) WILLMER, E.N., Retinal structure and colour vision. Cambridge University Press, Cambridge 1946

(144) WILLMER, E.N., Further observation on the properties of the central fovea in colour-blind and normal subjects. J. Physiol. 110 (1949), S. 442-446

(145) WILLMER, E.N. u. W.D. WRIGHT, Colour sensitivity of the fovea centralis. Nature, Lond. 156 (1945), S. 119-120

(146) WOOTEN, B.R. u. G. WALD, Colour vision mechanism in the peripheral retinas of normal and dichromatic observers. J. gen. Physiol. 61 (1973), S. 125-145

(147) WRIGHT, W.D., A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours. Tans. Opt. Soc. London 30 (1928/29), S. 144-164

(148) WRIGHT, W.D., Researches on normal and defective colour vision. London: Kimpton 1946

(149) WYSZECKI, G. u. W.S. STILES, colour Science. New York: Wiley 1967

(150) WYSZECKI, G., First N.R.C. progress report on field trials (Donaldson colorimeter) of colour-matching functions. Report No. APOI 907, N.R.C. Ottawa (1959)

(151) YOUNG, T., On the theory of light and colours. Phil. Trans. Roy. Soc. (1800), In: Lectures in Nat. Phil. Vol. 2, S. 613-632, London: printed for Joseph Johnson, St. Paul's Church by William Savage 1807

(152) ZURMÜHL, R., Matrizen und ihre technischen Anwendungen. Springer-Verl., Berlin/Göttingen/Heidelberg 1964

L E B E N S L A U F

11.5.55	geboren in Mönchengladbach als fünftes Kind des Kaufmanns Wilhelm Scheufens und seiner Ehefrau Käthe, geb. de Renet.
1961-1965	Volksschule Mönchengladbach
1965-197?	Stiftisches Humanistisches Gymnasium Mönchengladbach
Mai 1973	Reifeprüfung
Juli 1973- Sept. 1974	Grundwehrdienst bei der Bundeswehr
WS 1974- SS. 1976	Studium der Mathematik und Physik an der Universität Düsseldorf
Okt. 1976	Zwischenprüfung
WS. 1976	Studium der Medizin an der Universität Düsseldorf
August 1978	Physikum
August 1979	Erster Teil des Staatsexamens
August 1981	Zweiter Teil des Staatsexamens
Oktober 1982	Dritter Teil des Stattsexamens
ab WS 1979	Dissertation am II. Physiologischen Institut der Universität Düsseldorf unter Betreuung von Prof. Dr. H. Scheibner

Herrn Prof. Dr. J. Haase danke ich für die Bereitstellung des Arbeitsplatzes.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. H. Scheibner für die Überlassung des Themas und die Betreuung der Arbeit.

Den Mitarbeitern des II. Physiologischen Instituts der Universität Düsseldorf danke ich für ihre stetige Hilfsbereitschaft und tatkräftige Unterstützung.

D. GRÄBNER
Dissertations- u. Offsetdruckerei
Gotenstraße 3
8602 Altendorf bei Bamberg
Telefon 09545 / 8791